



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

**UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
Departamento de Engenharia Civil**

**Isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade – Desempenho,
aplicações, otimização e comparação com outros isolamentos**

Por: Miguel Jorge Monteiro de Magalhães Ferreira

**Tese de Doutoramento apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade
do Porto**

Orientadora: Professora Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho

Porto, 2017



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

**UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
Departamento de Engenharia Civil**

**Isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade – Desempenho,
aplicações, otimização e comparação com outros isolamentos**

Por: Miguel Jorge Monteiro de Magalhães Ferreira

**Tese de Doutoramento apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade
do Porto**

Orientadora: Professora Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho

Porto, 2017

À memória do meu pai
Eng.º Civil António Hortas Magalhães Ferreira

AGRADECIMENTOS

- À Professora Doutora Maria Helena Corvacho por todo o incansável apoio, pela orientação, úteis conselhos e disponibilidade inextinguíveis ao longo deste percurso;
- Ao Professor Doutor Albino Reis por me ter inspirado no sentido do desenvolvimento da investigação sobre este tipo de materiais de isolamento e por me ter colocado em contacto com a empresa EPOLI, S.A;
- À empresa EPOLI, Espumas de Polietileno S.A, particularmente ao Eng.º Fernando Almeida e ao Eng.º Paulo Chavarria pela disponibilização de visitas guiadas à empresa, explicação da constituição e processo de fabrico bem como cedência de amostras de ALUFACE® para a realização dos ensaios;
- Ao Eng.º Pedro Pereira da FEUP pelo apoio na parte instrumental relativa aos ensaios de campo;
- A Piet Standaert da Physibel (Maldegem, Bélgica) por todo o apoio concedido na elucidação de várias dúvidas relacionadas com a utilização do programa informático CAPSOL;
- Ao Doutor Luís Matias pela cedência de um exemplar da sua tese de mestrado bem como pela reunião que me concedeu no LNEC para falarmos sobre o ponto de situação da investigação nesta área;
- A todas as pessoas, que via correio eletrónico me forneceram úteis conselhos e apoio, com relevância para Mário Medina da Universidade do Kansas – EUA, Dave Yarbrough da R&D Services, Inc. de Cookeville, Tennessee – EUA e Frédéric Miranville da Universidade de Reunião – França;
- À minha Esposa Eduarda, e às minhas filhas Íris e Rita pelo apoio, compreensão e auxílio demonstrados ao longo da execução deste trabalho;
- Ao meu falecido pai que pelo seu exemplo como Engenheiro Civil desenvolveu em mim o gosto por esta área do conhecimento;
- Aos meus Pais e Sogros por todo o apoio concedidos ao longo da minha vida.

Resumo

Palavras-chave: Isolamentos térmicos, refletividade, baixa emissividade, elementos construtivos, temperaturas interiores.

O presente trabalho tem como objeto o estudo do desempenho térmico, e dos campos de aplicação em edifícios, dos isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade (ITRBEs) bem como a respetiva comparação com outros materiais de isolamento. Para tal, numa primeira fase, realizou-se um estudo experimental levado a cabo sobre as potencialidades destes isolamentos em coberturas de edifícios residenciais unifamiliares e em condições climáticas de Verão. A maior parte dos estudos experimentais empreendidos sobre esta matéria são realizados em modelos reduzidos, sendo que, com muito menor frequência, se utiliza um edifício real, como o do presente estudo. Deste modo, com este trabalho, monitorizou-se, em período de verão, uma série de variáveis ambientais exteriores e interiores, bem como os inerentes fluxos de calor, relativamente a uma moradia situada no concelho da Maia, Portugal.

Numa 2ª fase, e após a validação do procedimento, por comparação com os resultados experimentais, foi usado um programa informático de simulação dinâmica (CAPSOL) para o desenvolvimento do estudo de várias utilizações, tanto em período de verão como de inverno, de ITRBEs em edifícios, situados em diversos locais com climas específicos, sobretudo nas respetivas coberturas mas também nas paredes e envidraçados. Existiu sempre a preocupação de, no âmbito da simulação numérica, comparar o desempenho dos ITRBEs com o de isolamentos convencionais resistivos, sobretudo no que respeita à sua utilização em coberturas de edifícios, pois a aplicação, nestes elementos construtivos, de materiais que funcionem como barreira à transferência de calor por radiação, poderá resultar em impactos interessantes. Também se compararam os resultados de diferentes disposições

destas barreiras à transferência de calor por radiação e avaliou-se a influência da deposição, nas respetivas superfícies, de pó e de sujidades, no comportamento térmico destes isolamentos.

De uma maneira geral, concluiu-se com este estudo, que mesmo em climas como os do Grande Porto, em que as temperaturas máximas atingidas no verão, não serão tão elevadas como noutras zonas do País e do Mundo, o uso de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade provoca a atenuação da temperatura máxima atingida no interior das habitações bem como a diminuição dos fluxos de calor do exterior para o interior. Assim, sobretudo em períodos de verão, em que a temperatura do ar exterior e a radiação solar são mais elevadas, o efeito do uso de ITRBEs se traduz em [resultados](#) interessantes, sendo assim de ponderar o seu uso como complemento dos materiais tradicionais de isolamento resistivo. Concluiu-se, igualmente, que é importante ter em conta a alteração do comportamento térmico dos ITRBEs, devido à deposição nas suas superfícies de pó e sujidades, sendo que, deste modo, é fundamental considerar soluções que minimizem este problema.

Abstract

Key words: Thermal insulation, reflectivity, low emissivity, construction elements, internal temperatures.

The goal of the present work is to study the thermal performance of low-emissivity reflective thermal insulation materials (LERTIMs), and their use in buildings, making a comparison with the performance of other insulation materials. To do this, in the first phase, an experimental study was carried out, with summer climatic conditions, about the potentialities of the application of this type of insulation in building roofs. Most of the experimental studies carried out on this matter are developed in test cells, and only in a few times a real building is used, as it is the case of the present study. Thus, with this work, a series of building external and internal environmental parameters, as well as the inherent heat fluxes, were monitored during summer periods, in a dwelling located in the Maia, Portugal.

In a second phase, and after the validation of the followed procedure by comparison with the experimental results, a dynamic thermal simulation software (CAPSOL) was used to develop the study of several uses and settings of LERTIMs, mainly in the roofs but also in the walls and windows of the buildings located in several different places with specific summer and winter climatic conditions. There has always been a concern, in the numerical simulation, to compare the performance of LERTIMs with those of conventional resistive insulation, especially with regard to their use in buildings roofs, because the application in these construction elements of systems that act as a barrier to the transfer of radiation heat, can lead to an interesting impact. The results of different settings of these barriers to the radiation heat transfer were compared and the influence of dust and dirt deposition on the LERTIMs surfaces was evaluated.

In general, it was concluded from this study that even in climates such as those that occurs in Oporto region, where the maximum temperatures reached in the summer are not so high as in other Portugal and World regions, the use of low-emissivity reflective thermal insulation materials leads to an attenuation of the maximum temperature reached inside the buildings, as well leads to an reduction of the heat flow from the exterior to the interior. Thus, especially in summer periods, where the outside air temperature and solar radiation are higher, the effect of the use of LERTIMs result into interesting benefits, and thus it's possible to consider their use as a complement to traditional resistive insulation materials. It was also concluded, that it is important to take into account the change of the LERTIMs thermal behavior due to the deposition of dust and therefore to consider solutions that minimize this problem is essential.

ÍNDICE GERAL

CAPÍTULO I INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO, MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS GERAIS	1
1.2 ORGANIZAÇÃO E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.2.1 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO II - FÍSICA DAS RADIAÇÕES E TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	4
1.2.2 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO III – SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO	4
1.2.3 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO IV – ESTADO DA ARTE E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
1.2.4 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO V – DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO E DA METODOLOGIA DE ENSAIO.....	5
1.2.5 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO VI – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS	5
1.2.6 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO VII – METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E OBTENÇÃO DE DADOS BASE	5
1.2.7 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO VIII – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	5
1.2.8 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO IX – CONCLUSÕES	6
1.3 METODOLOGIAS E TÉCNICAS USADAS.....	6
 CAPÍTULO II FÍSICA DAS RADIAÇÕES E TRANSFERÊNCIA DE CALOR	 8
2.1 ENQUADRAMENTO	8
2.2 NATUREZA DA LUZ.....	8
2.3 ESPETRO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.....	9
2.4 INTERAÇÃO DA ENERGIA ELETROMAGNÉTICA COM OS CORPOS	11
2.5 LUZ VISÍVEL	13
2.6 RADIAÇÃO INFRAVERMELHA	14
2.7 RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA.....	16
2.8 TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	17
2.8.1 CONDUÇÃO	17
2.8.2 CONVECÇÃO	18

2.8.3 RADIAÇÃO	19
2.8.3.1 Radiosidade	19
2.8.3.2 Absortividade, refletividade, transmissibilidade e emissividade.....	23
2.8.3.3 Corpo Negro	26
2.8.3.4 Corpo Cinzento.....	31
2.8.3.5 Corpo real	32
2.8.3.6 Transferência de calor por radiação entre superfícies	35
2.8.3.7 Transferência de calor por radiação entre duas superfícies paralelas e infinitas.....	37
2.8.3.8 Transferência de calor por radiação entre outros tipos de superfícies.....	40
2.8.3.9 Aplicação aos isolantes térmicos refletantes de baixa emissividade.....	42
 CAPÍTULO III SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO	44
3.1 CONCEITO DE ISOLAMENTO TÉRMICO.....	44
3.2 COMPORTAMENTO DOS ISOLAMENTOS TÉRMICOS RESISTIVOS	46
3.2.1 PRINCÍPIOS GERAIS	46
3.2.2 A POROSIDADE NOS ISOLAMENTOS RESISTIVOS	48
3.3 COMPORTAMENTO DOS ISOLAMENTOS TÉRMICOS REFLETANTES DE BAIXA EMISSIVIDADE	50
3.3.1 CARACTERÍSTICAS E CUIDADOS NA APLICAÇÃO.....	50
3.3.2 USO DE FOLHAS DE ALUMÍNIO.....	52
3.3.3 USO DE PELÍCULAS POLIMÉRICAS METALIZADAS	64
 CAPÍTULO IV ESTADO DA ARTE E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	65
4.1 NOTA EXPLICATIVA.....	65
4.2 ESTUDOS REALIZADOS EM PORTUGAL.....	65
4.3 ESTUDOS REALIZADOS NO BRASIL	72
4.4 ESTUDOS REALIZADOS NOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA	96
4.5 ESTUDOS REALIZADOS EM ESPANHA	116
4.6 ESTUDOS REALIZADOS NA AUSTRÁLIA.....	120
4.7 ESTUDOS REALIZADOS EM FRANÇA.....	125
4.8 ESTUDOS REALIZADOS EM ITÁLIA	132
4.9 OUTROS ESTUDOS.....	136

CAPÍTULO V DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO E DA METODOLOGIA DE ENSAIO	142
5.1 DESCRIÇÃO GERAL DO CASO DE ESTUDO	142
5.2 CONSTITUIÇÃO E CARATERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS	146
5.3 OBJETIVOS E METODOLOGIA DO ESTUDO.....	150
5.4 METODOLOGIA DE ENSAIO E EQUIPAMENTOS USADOS.....	152
5.5 CALIBRAÇÃO.....	166
CAPÍTULO VI APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS	171
6.1 ENSAIOS REALIZADAS NO VERÃO DE 2010	171
6.1.1 PERÍODOS DE TEMPO CONSIDERADOS PARA A ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES.....	171
6.1.2 PRIMEIRA FASE: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA A TOTALIDADE DOS PERÍODOS DE MEDIÇÃO	173
6.1.3 SEGUNDA FASE: COMPARAÇÃO PARA PERÍODOS UM POUCO MAIS REDUZIDOS EM QUE AS DURAÇÕES BEM COMO OS INSTANTES DE INÍCIO E FIM FORAM IGUAIS.....	175
6.1.3.1 Comparação usando períodos contínuos	175
6.1.3.2 Comparação usando valores discretos correspondentes aos valores mais elevados da temperatura exterior e da radiação solar	178
6.1.3.3 Comparação usando valores contínuos correspondentes às temperaturas mais elevadas	181
6.1.4 TERCEIRA FASE: COMPARAÇÃO NUM PERÍODO EM QUE AS EVOLUÇÕES DAS TEMPERATURAS EXTERIORES DO AR SÃO SIMILARES E EM QUE EXISTE A GARANTIA DE NÃO ABERTURA DOS VÃOS	183
6.2 ENSAIOS REALIZADAS NO VERÃO DE 2011	192
6.2.1 PROCEDIMENTOS SEGUIDOS NAS MEDIÇÕES	192
6.2.2 COMPARAÇÃO DAS SITUAÇÕES COM E SEM ISOLAMENTO TÉRMICO COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE USANDO UM SÓ DATALOGGER.....	194

6.2.3 COMPARAÇÃO COM E SEM ISOLAMENTO TÉRMICO COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE USANDO UM DATALOGGER EM CADA DESVÃO DE COBERTURA.....	199
---	-----

CAPÍTULO VII METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E OBTENÇÃO DE DADOS BASE	206
7.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM O PROGRAMA INFORMÁTICO CAPSOL V4.0W	206
7.2 OBTENÇÃO DOS DADOS CLIMÁTICOS USADOS NO CAPSOL V4.0W	217
7.2.1 DADOS CLIMÁTICOS DE LOCAIS DE PORTUGAL	217
7.2.2 DADOS CLIMÁTICOS DE LOCAIS DA COMUNIDADE DE PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA (CPLP)	220
7.3 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA EMISSIVIDADE DE SUPERFÍCIES DE MATERIAIS	222

CAPÍTULO VIII APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	232
8.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS <i>IN SITU</i> COM OS OBTIDOS PELO CAPSOL.....	232
8.1.1 COMPARAÇÃO PARA A SITUAÇÃO SEM ITRBE	233
8.1.2 COMPARAÇÃO PARA A SITUAÇÃO DE APLICAÇÃO DE ITRBE POR CIMA DA LAJE DE ESTEIRA.....	235
8.1.3 COMPARAÇÃO PARA A SITUAÇÃO DE APLICAÇÃO DE ITRBE TANTO POR CIMA DA LAJE DE ESTEIRA COMO POR BAIXO DAS VERTENTES.....	239
8.2 ESTUDO DE VÁRIOS CENÁRIOS NO EDIFÍCIO ISOLADO PELO INTERIOR, COM COBERTURA DE DUAS ÁGUAS E ESTEIRA	242
8.2.1 EDIFÍCIO COM ESTEIRA PESADA E SEM QUALQUER TIPO DE ISOLAMENTO TÉRMICO NA COBERTURA	247
8.2.1.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	247
8.2.1.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	253
8.2.2 EDIFÍCIO COM ITRBE POR CIMA DA ESTEIRA PESADA	255
8.2.2.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	255

8.2.2.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	258
8.2.3 EDIFÍCIO COM LÃ DE ROCHA COM 4 CM DE ESPESSURA POR CIMA DA ESTEIRA PESADA	260
8.2.3.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	260
8.2.3.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	264
8.2.4 EDIFÍCIO INTEGRANDO ESTEIRA PESADA E COM ITRBE POR BAIXO DAS VERTENTES DA COBERTURA	265
8.2.4.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	265
8.2.4.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	271
8.2.5 EDIFÍCIO COM ESTEIRA LEVE E SEM QUALQUER TIPO DE ISOLAMENTO TÉRMICO NA COBERTURA	273
8.2.5.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	273
8.2.5.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	279
8.2.6 EDIFÍCIO COM ITRBE POR CIMA DA ESTEIRA LEVE.....	280
8.2.6.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	280
8.2.6.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	283
8.2.7 EDIFÍCIO COM ITRBE POR CIMA DA ESTEIRA LEVE E COM ACUMULAÇÃO DE PÓ.	285
8.2.8 EDIFÍCIO INTEGRANDO ESTEIRA LEVE E COM ITRBE POR BAIXO DAS VERTENTES DA COBERTURA.	286
8.2.8.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	286
8.2.8.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	293
8.2.9 EDIFÍCIO COM LÃ DE ROCHA DE 4 CM DE ESPESSURA POR CIMA DA ESTEIRA LEVE.	297
8.2.9.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	297
8.2.9.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	300
8.2.10 EDIFÍCIO INTEGRANDO ESTEIRA LEVE, COM ITRBE POR BAIXO DAS VERTENTES DA COBERTURA E COM ACUMULAÇÃO DE PÓ.....	302
8.2.11 EDIFÍCIO COM LÃ DE ROCHA DE 8 CM DE ESPESSURA POR CIMA DA ESTEIRA LEVE.	305
8.3 ESTUDO DE VÁRIOS CENÁRIOS NO EDIFÍCIO ISOLADO PELO EXTERIOR, COM COBERTURA DE DUAS ÁGUAS E ESTEIRA LEVE.....	308

8.3.1 EDIFÍCIO SEM QUALQUER TIPO DE ISOLAMENTO TÉRMICO NA COBERTURA.....	309
8.3.1.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	309
8.3.1.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	311
8.3.2 EDIFÍCIO INTEGRANDO ITRBE POR BAIXO DAS VERTENTES DA COBERTURA.....	312
8.3.2.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	312
8.3.2.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	313
8.3.3 EDIFÍCIO COM LÃ DE ROCHA DE 8 CM DE ESPESSURA POR CIMA DA ESTEIRA LEVE.	314
8.3.3.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	314
8.3.3.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	316
8.3.4 EDIFÍCIO COM LÃ DE ROCHA DE 8 CM DE ESPESSURA SOB A VERTENTES DA COBERTURA.	317
8.3.5 EDIFÍCIO COM ITRBE SOBRE A ESTEIRA LEVE E SOB AS VERTENTES DA COBERTURA.....	318
8.3.6 EDIFÍCIO COM LÃ DE ROCHA DE 8 CM DE ESPESSURA SOBRE A ESTEIRA LEVE E ITRBE, COM PÓ, SOB AS VERTENTES DA COBERTURA.	319
8.3.7 ITRBE APLICADO SOB AS VERTENTES DA COBERTURA E NA CAIXA DE AR ESTANQUE SOBRE A ESTEIRA LEVE COM 8 CM DE LÃ DE ROCHA..	321
8.3.8 ITRBE SOMENTE NA PARTE SUPERIOR DE CAIXA DE AR SOBRE A ESTEIRA LEVE COM 4 CM DE LÃ DE ROCHA..	323
8.3.8.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	323
8.3.8.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	326
8.4 ESTUDO DE VÁRIOS CENÁRIOS NO EDIFÍCIO COM COBERTURA INCLINADA SEM ESTEIRA.....	327
8.4.1 SEM QUALQUER ISOLAMENTO TÉRMICO NA COBERTURA.....	327
8.4.1.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	327
8.4.1.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	328
8.4.2 COM ITRBE SOB AS VERTENTES DA COBERTURA.....	329
8.4.2.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	329
8.4.2.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	336

8.4.3 COM LÃ DE ROCHA DE 8 CM DE ESPESSURA SOB AS VERTENTES DA COBERTURA.....	340
8.4.3.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	340
8.4.3.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	343
8.4.4 ITRBE COM PÓ, POR BAIXO DE LÃ DE ROCHA COM 8 CM DE ESPESSURA, AMBOS SOB AS VERTENTES DA COBERTURA.....	344
8.4.5 LÃ DE ROCHA COM 8 CM DE ESPESSURA POR BAIXO DE ITRBE COM PÓ, AMBOS SOB AS VERTENTES DA COBERTURA.....	346
8.4.6 COM ITRBE DE MÁ QUALIDADE SOB AS VERTENTES DA COBERTURA.....	348
8.5 ESTUDO DE VÁRIOS CENÁRIOS NO EDIFÍCIO COM COBERTURA EM TERRAÇO.	351
8.5.1 EXISTÊNCIA DE TETO FALSO SEM QUALQUER TIPO DE ISOLAMENTO.....	351
8.5.2 ITRBE POUSADO NO TETO FALSO.....	354
8.5.3 ITRBE APLICADO A NÍVEL INTERMÉDIO NA CAIXA DE AR DO TETO FALSO..	357
8.5.4 LÃ DE ROCHA POUSADA EM CIMA DO TETO FALSO.....	358
8.5.5 APLICAÇÃO DE TELA COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE NA SUPERFÍCIE SUPERIOR DA COBERTURA HORIZONTAL..	359
8.5.6 APLICAÇÃO DE PORTADAS INTERIORES COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE NA SUA SUPERFÍCIE EXTERIOR..	361
8.5.7 APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DE BAIXA EMISSIVIDADE NA SUPERFÍCIE EXTERIOR DAS FACHADAS..	363
8.5.8 APLICAÇÃO DE ITRBE EM POSIÇÃO INTERMÉDIA NA CAIXA DE AR DE UMA PAREDE DUPLA.....	364
8.5.8.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	364
8.5.8.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	365
8.5.9 IMPACTO DA ABERTURAS DAS PORTADAS DAS JANELAS..	366
8.5.10 ISOLAMENTO PELO EXTERIOR DAS FACHADAS E COBERTURA ALTERNADAMENTE COM MATERIAL RESISTIVO E COM ITRBE.....	369
8.5.10.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores.....	369
8.5.10.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores	376
8.6 NOTAS FINAIS SOBRE AS SIMULAÇÕES EFETUADAS..	382

CAPÍTULO IX CONCLUSÕES	383
9.1 NOTA INTRODUTÓRIA.....	383
9.2 CONCLUSÕES RELATIVAS ÀS MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS.....	383
9.2.1 DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES.....	383
9.2.2 DA COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES COM OS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	385
9.3 CONCLUSÕES RELATIVAS AOS VÁRIOS CENÁRIOS SIMULADOS	386
9.4 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	388
 BIBLIOGRAFIA	 390

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II FÍSICA DAS RADIAÇÕES E TRANSFERÊNCIA DE CALOR	8
Figura 2.1 ESPETRO ELETROMAGNÉTICO	10
Figura 2.2 INTERAÇÃO DA ENERGIA ELETROMAGNÉTICA COM A SUPERFÍCIE DA TERRA	11
Figura 2.3 EFEITO DE ESTUFA TERRESTRE	12
Figura 2.4 EFEITO DE ESTUFA EM CONSTRUÇÕES AGRÍCOLAS	12
Figura 2.5 EXPERIÊNCIA DE HERSCHEL.....	14
Figura 2.6 ESPETRO DE RADIAÇÃO DO SOL E DA TERRA.....	15
Figura 2.7 EMISSÃO DA RADIAÇÃO ASSOCIADA A UM ÂNGULO SÓLIDO	20
Figura 2.8 NATUREZA DIRECIONAL E ESPETRAL DA IRRADIAÇÃO	22
Figura 2.9 RADIOSIDADE DE UMA SUPERFÍCIE.....	23
Figura 2.10 CORPO NEGRO MATERIALIZADO POR UMA CAVIDADE	27
Figura 2.11 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO DE PLANCK.....	28
Figura 2.12 DISTRIBUIÇÃO ESPETRAL DA RADIAÇÃO SOLAR	31
Figura 2.13 CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPETRAL DOS CORPOS NEGROS, CINZENTOS E REAIS	32
Figura 2.14 EMISSIVIDADE ESPETRAL DOS CORPOS NEGROS, CINZENTOS E REAIS.....	33
Figura 2.15 VARIAÇÃO DA ABSORTIVIDADE E DA REFLETIVIDADE NORMAIS COM O COMPRIMENTO DE ONDA.....	34
Figura 2.16 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE FORMA ASSOCIADO À TROCA DE RADIAÇÃO ENTRE SUPERFÍCIES.....	36
Figura 2.17 CAVIDADE FECHADA	37
Figura 2.18 TROCA DE RADIAÇÃO ENTRE DUAS SUPERFÍCIES PARALELAS E INFINITAS	37
Figura 2.19 CIRCUITO DE RADIAÇÃO PARA DUAS SUPERFÍCIES CINZAS PARALELAS E INFINITAS	40
Figura 2.20 CAVIDADE CONSTITUÍDA POR DUAS SUPERFÍCIES	40
Figura 2.21 EXEMPLO DE FATOR DE FORMA PARA GEOMETRIA BIDIMENSIONAL.....	41
Figura 2.22 EXEMPLIFICAÇÃO DE FATOR DE FORMA PARA GEOMETRIA TRIDIMENSIONAL.....	41
Figura 2.23 FATOR DE FORMA PARA RETÂNGULOS PERPENDICULARES COM ARESTA COMUM	42
Figura 2.24 TROCA DE CALOR POR RADIAÇÃO ENTRE SUPERFÍCIES PARALELAS INFINITAS COM INTERPOSIÇÃO DE BARREIRA À RADIAÇÃO.....	42
Figura 2.25 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE.....	43

CAPÍTULO III SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO	44
Figura 3.1 DEPENDÊNCIA DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DE ALGUNS MATERIAIS SÓLIDOS COM A TEMPERATURA.....	47
Figura 3.2 ESQUEMA DE MONTAGEM DA COBERTURA EM TELHADO CERÂMICO	51
Figura 3.3 APLICAÇÃO DO ISOLAMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE SOB UMA COBERTURA METÁLICA.....	54
Figura 3.4 ESQUEMA DE APLICAÇÃO DO ISOLAMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE EM COBERTURAS	55
Figura 3.5 APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE NAS FACHADAS DO CASINO DA FIGUEIRA DA FOZ	56
Figura 3.6 ESQUEMA DE APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE EM CAIXAS DE AR DE PAREDES DUPLAS.....	57
Figura 3.7 ESQUEMA DE APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE PELA SUPERFÍCIE INTERIOR DE PAREDES DE FACHADA	57
Figura 3.8 ESQUEMA DE APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE PELA SUPERFÍCIE EXTERIOR DE PAREDES DE FACHADA	58
Figura 3.9 ESQUEMA DE APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE EM PAVIMENTOS E TETOS FALSOS.....	58
Figura 3.10 PROTEÇÃO EM ALUMÍNIO NA ESTAÇÃO ESPACIAL INTERNACIONAL	59
Figura 3.11 CONSTITUIÇÃO DAS EMBALAGENS DE CARTÃO PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS	59
Figura 3.12 PORÇÃO DE PAREDE DE UMA EMBALAGEM DE CARTÃO PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS SUBMETIDA AO FOGO	60
Figura 3.13 AÇÃO DO FOGO NAS PAREDES DE UMA EMBALAGEM DE CARTÃO PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS COM FOLHA DE ALUMÍNIO.....	61
Figura 3.14 TELHA FABRICADA COM EMBALAGENS RECICLADAS DE CARTÃO PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS	62
Figura 3.15 MANTAS TÉRMICAS DE EMBALAGENS DE CARTÃO PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS	62
Figura 3.16 APLICAÇÃO NA LAJE DE ESTEIRA DE EMBALAGENS DE CARTÃO PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS	63
Figura 3.17 APLICAÇÃO NA LAJE DE ESTEIRA DE EMBALAGENS DE CARTÃO PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS NO EDIFÍCIO OBJETO DE ESTUDO PELO AUTOR	63
Figura 3.18 ECOTELHA PRODUZIDA COM TUBOS DE PASTA DENTÍFRICA RECICLADA	64
 CAPÍTULO IV ESTADO DA ARTE E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 65
Figura 4.1 DISPOSITIVO USADO PELO LNEC PARA ESTUDAR O COMPORTAMENTO DE VÁRIOS TIPOS DE PROTEÇÕES TÉRMICAS REFLETANTES.....	65

Figura 4.2 MODOS DE APLICAÇÃO DAS PROTEÇÕES REFLETANTES NAS VERTENTES DA COBERTURA.....	68
Figura 4.3 RESULTADOS DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR NO ESTUDO DE AKUTSU E VITTORINO	73
Figura 4.4 RESULTADOS DA TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE NO ESTUDO DE AKUTSU E VITTORINO	73
Figura 4.5 APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO REFLETANTE NA COBERTURA DO ESTUDO DE VECCHI	75
Figura 4.6 COMPORTAMENTO À RADIAÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO OPACOS.....	77
Figura 4.7 APLICAÇÃO DE BARREIRA RADIANTE COMO FORRO DE COBERTURA.....	80
Figura 4.8 MODELO REDUZIDO PARA ENSAIOS NO ESTUDO DE DARÉ, TARGA E ISA.....	80
Figura 4.9 CÉLULAS USADAS NO ESTUDO DE CARLETTO	82
Figura 4.10 EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS DE BOLBO SECO NUM DIA REPRESENTATIVO	83
Figura 4.11 SETORES DA COBERTURA DE UM EDIFÍCIO USADOS PARA ENSAIO	85
Figura 4.12 DISPOSITIVO DE ENSAIO DO COMPORTAMENTO DE BARREIRAS RADIANTES	88
Figura 4.13 TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS CHAPAS NA SITUAÇÃO INTEGRANDO CAIXAS-DE-AR.....	90
Figura 4.14 TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS CHAPAS NA SITUAÇÃO INTEGRANDO VÁCUO.....	91
Figura 4.15 TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS CHAPAS NA SITUAÇÃO INTEGRANDO LÃ DE VIDRO	91
Figura 4.16 IMAGEM DE TERMOGRAFIA DE UMA COBERTURA EM ALUMÍNIO	93
Figura 4.17 ISOLAMENTO REFLETANTE ANTES DE SE APLICAR O REVESTIMENTO DE COBERTURA.....	93
Figura 4.18 SENSIBILIDADE DA EMISSIVIDADE À DENSIDADE DO PÓ	99
Figura 4.19 REDUÇÃO DO FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DA ESTEIRA EM FUNÇÃO DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA EXTERIOR/INTERIOR.....	102
Figura 4.20 RESULTADOS DO FLUXO DE CALOR DA APLICAÇÃO TRB EM RELAÇÃO AO MODELO DE REFERÊNCIA	105
Figura 4.21 RESULTADOS DA REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA DA APLICAÇÃO TRB PARA OS VÁRIOS MESES DO ANO.....	107
Figura 4.22 RESULTADOS DA DIMINUIÇÃO DO FLUXO DE CALOR COM APLICAÇÃO DE BARREIRAS RADIANTES EM FUNÇÃO DA EMISSIVIDADE.....	108
Figura 4.23 REDUÇÃO DO FLUXO DE CALOR PROPORCIONADO PELA APLICAÇÃO DE BARREIRAS RADIANTES NOS EUA	111
Figura 4.24 REDUÇÃO DO FLUXO DE CALOR PROPORCIONADA PELA APLICAÇÃO DE BARREIRAS RADIANTES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO AR EXTERIOR	111

Figura 4.25 POUPANÇA ANUAL EM DÓLARES DEVIDO À APLICAÇÃO DE BARREIRAS RADIANTES	113
Figura 4.26 EQUIVALÊNCIA ENTRE O COMPORTAMENTO DE ISOLAMENTOS REFLETANTES E ISOLAMENTOS TRADICIONAIS	116
Figura 4.27 COLOCAÇÃO DE ISOLAMENTOS REFLETANTES EM PAREDES COM A FORMAÇÃO DE DUAS CAIXAS DE AR.....	117
Figura 4.28 VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA COM A ESPESSURA DAS CAIXAS DE AR E COM A EMISSIVIDADE DAS BARREIRAS RADIANTES.....	119
Figura 4.29 DESVÃO DE COBERTURA DA CÉLULA 1 COM APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO REFLETANTE.....	120
Figura 4.30 DESVÃO DE COBERTURA DA CÉLULA 2 COM APLICAÇÃO DE LÃ DE VIDRO	121
Figura 4.31 ESQUEMATIZAÇÃO DE CÉLULA DE ENSAIO UTILIZADA POR BELUSKO, BRUNO E SAMAN	122
Figura 4.32 TEMPERATURAS DO TETO PARA O USO DE LÃ DE VIDRO R3 NA CÉLULA 2 E ISOLAMENTO REFLETANTE NA CÉLULA 1.....	123
Figura 4.33 FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DO TETO PARA O USO DE LÃ DE VIDRO R3 NA CÉLULA 2 E ISOLAMENTO REFLETANTE NA CÉLULA 1	124
Figura 4.34 MODELO DE CÉLULA DE ENSAIO USADA POR SOUBDHAN, FEUILLARD E BADE	126
Figura 4.35 CORTE DA COBERTURA OBJETO DO ESTUDO DE MIRANVILLE ET AL.	128
Figura 4.36 INSTRUMENTAÇÃO DA CÉLULA DE ENSAIO DE MIRANVILLE ET AL.	129
Figura 4.37 MODELO SIMPLIFICADO DE COBERTURA COM 3 ZONAS TÉRMICAS	130
Figura 4.38 PAREDES DUPLAS COM CAIXA DE AR, COM E SEM BARREIRA DE BAIXA EMISSIVIDADE, ENSAIADAS EM LABORATÓRIO POR BALDINELLI	132
Figura 4.39 DISPOSITIVO DA CAIXA QUENTE PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DE PAINÉIS DE BAIXA EMISSIVIDADE	134

CAPÍTULO V DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO E DA METODOLOGIA

DE ENSAIO	142
Figura 5.1 PLANTA DO 1º ANDAR DA PARTE ESTE EM ESTUDO	142
Figura 5.2 PLANTA DO DESVÃO DE COBERTURA DA PARTE ESTE EM ESTUDO	143
Figura 5.3 PLANTA DA COBERTURA DA PARTE ESTE EM ESTUDO.....	143
Figura 5.4 CORTE A'-A' DA PARTE ESTE EM ESTUDO	144
Figura 5.5 FACHADA ESTE DO CORPO DA MORADIA OBJETO DE ESTUDO	144
Figura 5.6 PLANTA DO 1º ANDAR DA PARTE OESTE EM ESTUDO.....	145
Figura 5.7 PLANTAS DO DESVÃO DA COBERTURA E DA COBERTURA DA PARTE OESTE EM ESTUDO	145
Figura 5.8 PARTE OESTE DA MORADIA OBJETO DE ESTUDO	146
Figura 5.9 PAVIMENTO DO QUARTO ESTE	147

Figura 5.10 INTERIOR DO DESVÃO DE COBERTURA ESTE, DURANTE A COLOCAÇÃO DO ISOLAMENTO TÉRMICO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE	148
Figura 5.11 INTERIOR DO DESVÃO DE COBERTURA OESTE.....	149
Figura 5.12 MAQUETA MOSTRANDO VÁRIAS DAS APLICAÇÕES DO ISOLAMENTO TÉRMICO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE.....	151
Figura 5.13 APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO TÉRMICO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE NAS VERTENTES DA COBERTURA ESTE.....	152
Figura 5.14 DATALOGGERS LIGADOS AOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA	153
Figura 5.15 SENSORES DE TEMPERATURA DO AR.....	153
Figura 5.16 INVÓLUCRO PROTETOR DA RADIAÇÃO SOLAR PARA SENSOR DE TEMPERATURA E HUMIDADE COLOCADO NO EXTERIOR	154
Figura 5.17 TERMOPAR TIPO T.....	154
Figura 5.18 TERMOPAR TIPO T APLICADO NAS TELHAS DA COBERTURA.....	155
Figura 5.19 TERMOPAR TIPO T APLICADO NA SUPERFÍCIE SUPERIOR DA LAJE DE ESTEIRA SOBRE A MANTA DE LÃ DE ROCHA	155
Figura 5.20 TERMOPAR TIPO T APLICADO NA SUPERFÍCIE INFERIOR DA LAJE DE ESTEIRA.....	156
Figura 5.21 TERMOPAR TIPO T APLICADO NA SUPERFÍCIE INFERIOR DO ISOLAMENTO TÉRMICO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE SOB AS VERTENTES DA COBERTURA	156
Figura 5.22 TERMOPAR TIPO T APLICADO NA SUPERFÍCIE SUPERIOR DO XPS	157
Figura 5.23 TERMOFLUXÍMETRO APLICADO NA SUPERFÍCIE INFERIOR DAS TELHAS DE COBERTURA.....	157
Figura 5.24 TERMOFLUXÍMETRO APLICADO NA SUPERFÍCIE SUPERIOR DA LAJE DE ESTEIRA SOBRE A MANTA DE LÃ DE ROCHA.....	158
Figura 5.25 TERMOFLUXÍMETRO APLICADO NA SUPERFÍCIE INFERIOR DO ISOLAMENTO TÉRMICO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE SOB AS VERTENTES	158
Figura 5.26 TERMOFLUXÍMETRO APLICADO NA SUPERFÍCIE SUPERIOR DO XPS.....	159
Figura 5.27 TERMOFLUXÍMETRO APLICADO SOB EMBALAGENS DE CARTÃO PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS	159
Figura 5.28 TERMÓMETRO DE BOLBO NEGRO	160
Figura 5.29 PIRANÓMETRO.....	160
Figura 5.30 ANEMÓMETRO E CATA-VENTO	161
Figura 5.31 PLATAFORMA JÁ COM A MONTAGEM DO PIRANÓMETRO, ANEMÓMETRO E CATA-VENTO	161
Figura 5.32 SUPORTE DA PLATAFORMA JÁ INSTALADO NUMA CHAMINÉ DA MORADIA.....	162
Figura 5.33 PLANTA DO 1º ANDAR DA ZONA ESTE COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2010	162
Figura 5.34 PLANTA DO DESVÃO DE COBERTURA DA ZONA ESTE COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2010	163

Figura 5.35 PLANTA DA COBERTURA DA ZONA ESTE COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2010	163
Figura 5.36 CORTE A' - A' COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2010	164
Figura 5.37 CORTE A - A COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2010	164
Figura 5.38 CORTE A - A COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2011	165
Figura 5.39 PLANTA DO 1º ANDAR DA ZONA OESTE COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2011	165
Figura 5.40 PLANTA DO DESVÃO DE COBERTURA DA ZONA OESTE COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2011.....	166
Figura 5.41 PLANTA DA COBERTURA DA ZONA OESTE COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2011	166
Figura 5.42 CÂMARAS CLIMÁTICAS.....	167
Figura 5.43 COLOCAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA COM LOGGER INCORPORADO NA CÂMARA CLIMÁTICA	167
Figura 5.44 COLOCAÇÃO DOS TERMOPARES TIPO T NA CÂMARA CLIMÁTICA	168
Figura 5.45 DATALOGGER NO EXTERIOR LIGADO AOS TERMOPARES TIPO T	168
Figura 5.46 EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS REGISTADAS NOS TESTES DE UM SENSOR COM LOGGER INCORPORADO	170
Figura 5.47 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS MEDIDAS PELA CÂMARA E POR UM TERMÔMETRO DIGITAL PORTÁTIL.....	170

CAPÍTULO VI APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

EXPERIMENTAIS	171
Figura 6.1 DESCARGA DE DADOS DE UM DATALOGGER PARA UM COMPUTADOR PORTÁTIL.....	172
Figura 6.2 TEMPERATURAS DO AR EXTERIOR E DO QUARTO EM PERÍODOS COM E SEM ISOLAMENTO TÉRMICO COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE	176
Figura 6.3 TEMPERATURAS DO AR EXTERIOR E DO DESVÃO EM PERÍODOS COM E SEM ISOLAMENTO TÉRMICO COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE	176
Figura 6.4 TEMPERATURAS DO AR EXTERIOR E DA RADIAÇÃO SOLAR TOTAL NA HORIZONTAL	177
Figura 6.5 INCÊNDIO OCORRIDO DURANTE O PERÍODO DE MEDIÇÃO.....	178
Figura 6.6 EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS DO AR EXTERIOR E DO QUARTO NOS PERÍODOS CONTÍNUOS DE TEMPERATURAS MAIS ELEVADAS.....	182
Figura 6.7 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO AR EXTERIOR E ESCOLHA DE UM PERÍODO DE ESTUDO.....	184
Figura 6.8 COMPARAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR TOTAL HORIZONTAL NO PERÍODO SELECIONADO	185

Figura 6.9 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS NO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS	186
Figura 6.10 COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR EXTERIOR FACE À DO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS	187
Figura 6.11 COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DO TETO NOS PERÍODOS SELECIONADOS	190
Figura 6.12 COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR EXTERIOR FACE À TEMPERATURA DO TETO DO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS	192
Figura 6.13 EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS DO AR EXTERIOR, DESVÃOS DE COBERTURA E QUARTOS DE 19/9/2011 a 21/9/2011	202
Figura 6.14 EVOLUÇÃO DAS HUMIDADES RELATIVAS DO AR EXTERIOR, DOS DESVÃOS DE COBERTURA E QUARTOS DE 19/9/2011 a 21/9/2011	203
Figura 6.15 PÓ ACUMULADO NO ISOLAMENTO TÉRMICO COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE APLICADO NA ESTEIRA E CORRESPONDENTE LIMPEZA.....	205

CAPÍTULO VII METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E OBTENÇÃO DE DADOS BASE	206
Figura 7.1 FLUXOS DE CALOR INTERZONAS POR CONDUÇÃO, CONVECÇÃO E RADIAÇÃO INFRATERMELHA NO CAPSOL.....	207
Figura 7.2 DEFINIÇÃO DAS ZONAS TÉRMICAS NO CAPSOL.....	207
Figura 7.3 CONDUÇÃO, CONVECÇÃO E RADIAÇÃO INFRATERMELHA NO CAPSOL	208
Figura 7.4 PROCESSAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR ATRAVÉS DAS ZONAS TÉRMICAS NO CAPSOL.....	209
Figura 7.5 CONDIÇÕES FRONTEIRA NO CAPSOL.....	210
Figura 7.6 CONTROLADORES DE TEMPERATURA PARA ARREFECIMENTO E AQUECIMENTO NO CAPSOL.....	211
Figura 7.7 CONFIGURAÇÃO DE VÁRIOS PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DO CAPSOL	213
Figura 7.8 DADOS CLIMÁTICOS DE BEJA EDITADOS EM GRÁFICO ATRAVÉS DO EDITOR DE FUNÇÕES DO CAPSOL	214
Figura 7.9 ESCOLHA DOS PARÂMETROS SOLARES A USAR PELO CAPSOL	215
Figura 7.10 IMPORTAÇÃO DOS DADOS CLIMÁTICOS PARA O CAPSOL.....	215
Figura 7.11 DADOS INSERIDOS NO SUBPROGRAMA DO CAPSOL DE CARATERIZAÇÃO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS.....	216
Figura 7.12 OBSTRUÇÃO DE HORIZONTE CONSIDERADA EM TODAS AS SIMULAÇÕES NO CAPSOL.....	219
Figura 7.13 VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DOS DADOS CLIMÁTICOS PARA A MAIA CONSIDERANDO A LONGITUDE REAL	219

Figura 7.14 VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DOS DADOS CLIMÁTICOS PARA A MAIA CONSIDERANDO A LONGITUDE ARTIFICIAL.....	220
Figura 7.15 CLIMA DE PETROLINA	220
Figura 7.16 CLIMA DE DILI	221
Figura 7.17 USO DO MENU “INPUT” DO FICHEIRO CLIN_CONVERT_02.....	222
Figura 7.18 DETETOR DO EMISSÓMETRO AE1	223
Figura 7.19 AJUSTE DO EMISSÓMETRO PARA A AMOSTRA DE $\varepsilon = 0,88$	223
Figura 7.20 AJUSTE DO EMISSÓMETRO PARA A AMOSTRA DE $\varepsilon = 0,05$	224
Figura 7.21 ASPETO DO PÓ E SUJIDADE ACUMULADOS NA ESTEIRA E RESPETIVA AMOSTRA PARA DETERMINAÇÃO DA EMISSIVIDADE.....	224
Figura 7.22 MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,29 PARA A SUPERFÍCIE SUPERIOR DO ITRBE APLICADO DURANTE 4 ANOS NA ESTEIRA.....	225
Figura 7.23 AMOSTRAS DO ITRBE APLICADO SOB AS VERTENTES DA COBERTURA	225
Figura 7.24 MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,38 PARA A SUPERFÍCIE SUPERIOR DO ITRBE APLICADO DURANTE 4 ANOS SOB AS VERTENTES DA COBERTURA.....	225
Figura 7.25 MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,07 PARA A SUPERFÍCIE INFERIOR DO ITRBE APLICADO DURANTE 4 ANOS SOB A VERTENTES DA COBERTURA	226
Figura 7.26 MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,56 PARA A SUPERFÍCIE DE PLÁSTICO ALUMINIZADO.....	226
Figura 7.27 MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,38 PARA A SUPERFÍCIE DE PLÁSTICO ALUMINIZADO.....	227
Figura 7.28 MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,29 PARA A SUPERFÍCIE INTERIOR DAS EMBALAGENS TIPO TETRAPAK®	227
Figura 7.29 MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,88 PARA A SUPERFÍCIE EXTERIOR DAS EMBALAGENS TIPO TETRAPAK®	228
Figura 7.30 ALUMÍNIO DAS EMBALAGENS TIPO TETRAPAK® E COMPARAÇÃO COM A SITUAÇÃO DE REVESTIMENTO COM POLIETILENO	228
Figura 7.31 MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,05 PARA A FOLHA DE ALUMÍNIO DAS EMBALAGENS TIPO TETRAPAK®	229
Figura 7.32 MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE DE 0,03 E 0,04 PARA AS FOLHAS DE ALUMÍNIO PARA EMBRULHAR ALIMENTOS	229
Figura 7.33 MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,17 PARA AS EMBALAGENS DE EMBRULHAR BOLACHAS	229
Figura 7.34 PREPARAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DA EMISSIVIDADE DE TELHAS CERÂMICAS	230
Figura 7.35 AJUSTE DA EMISSIVIDADE PARA O VALOR 0,07 DA FITA DE ALUMÍNIO APLICADA NA TELHA.....	230
Figura 7.36 AJUSTE DA EMISSIVIDADE PARA O VALOR 0,86 DA FITA DE PVC APLICADA NA TELHA	231
Figura 7.37 MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DA SUPERFÍCIE DA TELHA	231

CAPÍTULO VIII APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	232
Figura 8.1 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO QUARTO, NA SITUAÇÃO SEM ITRBE, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL	233
Figura 8.2 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO DESVÃO, NA SITUAÇÃO SEM ITRBE, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL	233
Figura 8.3 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO TETO DO QUARTO, NA SITUAÇÃO SEM ITRBE, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL.....	234
Figura 8.4 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DA FACE SUPERIOR DA ESTEIRA, NA SITUAÇÃO SEM ITRBE, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL	234
Figura 8.5 COMPARAÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR ATRAVÉS DA ESTEIRA, NA SITUAÇÃO SEM ITRBE, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL	235
Figura 8.6 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO QUARTO, NA SITUAÇÃO COM ITRBE NA ESTEIRA, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL	236
Figura 8.7 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO DESVÃO, NA SITUAÇÃO COM ITRBE NA ESTEIRA, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL	236
Figura 8.8 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO TETO DO QUARTO, NA SITUAÇÃO COM ITRBE NA ESTEIRA, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL	236
Figura 8.9 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DA FACE SUPERIOR DA ESTEIRA, NA SITUAÇÃO COM ITRBE APLICADO NESTA, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL.....	237
Figura 8.10 COMPARAÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR ATRAVÉS DA ESTEIRA, NA SITUAÇÃO COM ITRBE APLICADO NESTA, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL.....	237
Figura 8.11 MEDIÇÃO DO FLUXO DE CALOR COM TERMOFLUXÍMETRO SEM ESTAR REVESTIDO COM ALUMÍNIO POLIDO	238
Figura 8.12 MEDIÇÃO DO FLUXO DE CALOR COM TERMOFLUXÍMETRO REVESTIDO COM ALUMÍNIO POLIDO	239
Figura 8.13 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO QUARTO, NA SITUAÇÃO COM ITRBE NA ESTEIRA E NAS VERTENTES, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL.....	239
Figura 8.14 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO DESVÃO, NA SITUAÇÃO COM ITRBE NA ESTEIRA E NAS VERTENTES, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL.....	240
Figura 8.15 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO TETO DO QUARTO, NA SITUAÇÃO COM ITRBE NA ESTEIRA E NAS VERTENTES, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL	240
Figura 8.16 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DA FACE SUPERIOR DA ESTEIRA, NA SITUAÇÃO COM ITRBE APLICADO NESTA E NAS VERTENTES, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL.....	241
Figura 8.17 COMPARAÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR ATRAVÉS DA ESTEIRA, NA SITUAÇÃO COM ITRBE APLICADO NESTA E NAS VERTENTES, <i>IN SITU</i> VERSUS CAPSOL.....	241
Figura 8.18 INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR EM MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	245

Figura 8.19 INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR NA MAIA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	245
Figura 8.20 INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR EM BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	246
Figura 8.21 INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR EM PETROLINA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	246
Figura 8.22 INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR EM DILI NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	247
Figura 8.23 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.1 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	248
Figura 8.24 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.1 E PARA A MAIA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	248
Figura 8.25 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.1 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	249
Figura 8.26 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.1 E PARA PETROLINA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	249
Figura 8.27 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.1 E PARA DILI NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	250
Figura 8.28 INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR EM MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	253
Figura 8.29 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.1 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	253
Figura 8.30 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.5 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	274
Figura 8.31 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.5 E PARA A MAIA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	274
Figura 8.32 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.5 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	275
Figura 8.33 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.5 E PARA PETROLINA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	275
Figura 8.34 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.5 E PARA DILI NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	276
Figura 8.35 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.3.3 E PARA DILI NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	324
Figura 8.36 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.3.8 E PARA DILI NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	324
Figura 8.37 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.4.1 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	330

Figura 8.38 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.4.2 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	330
Figura 8.39 TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DO QUARTO NO CENÁRIO 8.4.1 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	332
Figura 8.40 TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DO QUARTO NO CENÁRIO 8.4.2 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	332
Figura 8.41 FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA (TETO DO QUARTO) E O QUARTO NO CENÁRIO 8.4.1 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	334
Figura 8.42 FLUXOS DE CALOR ENTRE O ITRBE (TETO DO QUARTO) E O QUARTO NO CENÁRIO 8.4.2 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	335
Figura 8.43 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.4.1 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	336
Figura 8.44 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.4.2 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	337
Figura 8.45 TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DO QUARTO NO CENÁRIO 8.4.1 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	337
Figura 8.46 TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DO QUARTO NO CENÁRIO 8.4.2 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	338
Figura 8.47 FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA (TETO DO QUARTO) E O QUARTO NO CENÁRIO 8.4.1 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	339
Figura 8.48 FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA (TETO DO QUARTO) E O QUARTO NO CENÁRIO 8.4.2 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	339
Figura 8.49 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.4.3 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	341
Figura 8.50 FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA (TETO DO QUARTO) E O QUARTO NO CENÁRIO 8.4.3 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	343
Figura 8.51 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.1 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	352
Figura 8.52 TEMPERATURAS DAS SUPERFÍCIES ENVOLVENTES DO QUARTO, PARA BEJA, NO CENÁRIO 8.5.1	353
Figura 8.53 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.2 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	354
Figura 8.54 TEMPERATURAS DAS SUPERFÍCIES DO QUARTO NO CENÁRIO 8.5.2 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	355
Figura 8.55 TEMPERATURAS DAS SUPERFÍCIES DO QUARTO NO CENÁRIO 8.5.6 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	362

Figura 8.56 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.9 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	366
Figura 8.57 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.10 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	370
Figura 8.58 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.7 P.E.0,03 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	370
Figura 8.59 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.1 P.E.0,03 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	373
Figura 8.60 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.10 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	376
Figura 8.61 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.7 P.E.0,03 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	376
Figura 8.62 TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.1 P.E.0,03 PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	379

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO II FÍSICA DAS RADIAÇÕES E TRANSFERÊNCIA DE CALOR 8

Quadro 2.1 NATUREZA DA ENERGIA ELETROMAGNÉTICA QUE CHEGA À SUPERFÍCIE DA TERRA.....	11
Quadro 2.2 FREQUÊNCIAS E COMPRIMENTOS DE ONDA PARA VÁRIAS CORES NO VAZIO	13
Quadro 2.3 CLASSIFICAÇÃO E INTERVALO ESPETRAL DAS RADIAÇÕES INFRAVERMELHAS SEGUNDO O CIE	15

CAPÍTULO III SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO 44

Quadro 3.1 EMISSIVIDADE ESPETRAL DA SUPERFÍCIE DE ALUMÍNIO DO ISOLAMENTO REFLETANTE USADO	54
--	----

CAPÍTULO IV ESTADO DA ARTE E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 65

Quadro 4.1 RESULTADOS DO ESTUDO DE VITTORINO, SATO E AKUTSU.....	78
Quadro 4.2 VALORES MÉDIOS DE TEMPERATURA DO AR NO INTERIOR DO MODELO DE DARÉ, TARGA E ISA.....	81
Quadro 4.3 VALORES CALCULADOS DO FLUXO DE CALOR ÀS 3 HORAS DE ENSAIO.....	82
Quadro 4.4 CARATERÍSTICAS DOS VÁRIOS SETORES ENSAIADOS DA COBERTURA.....	86
Quadro 4.5 RESULTADOS DA EFICIÊNCIA DAS SOLUÇÕES DE ISOLAMENTO PARA DIFERENÇA DE TEMPERATURA CONSTANTE	89
Quadro 4.6 RESULTADOS DA EFICIÊNCIA DAS SOLUÇÕES DE ISOLAMENTO PARA POTÊNCIA DISSIPADA CONSTANTE.....	89
Quadro 4.7 RESISTÊNCIA TÉRMICA EFETIVA DOS PROVETES ENSAIADOS EM CAIXA QUENTE COM GUARDA.....	97
Quadro 4.8 DESEMPENHO DAS BARREIRAS RADIANTES NAS VÁRIAS ZONAS CLIMÁTICAS DOS EUA	110
Quadro 4.9 VARIAÇÃO DO FLUXO DE CALOR EM FUNÇÃO DO TIPO DE ISOLAMENTO E DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SOLAR DO REVESTIMENTO DA COBERTURA.....	127
Quadro 4.10 RESISTÊNCIAS TÉRMICAS DA PAREDE COM BARREIRA DE BAIXA EMISSIVIDADE CALCULADAS ATRAVÉS DE VÁRIOS MÉTODOS EM REGIME ESTACIONÁRIO	135

CAPÍTULO V DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO E DA METODOLOGIA DE ENSAIO 142

Quadro 5.1 CARATERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DA LAJE DE ESTEIRA	149
--	-----

Quadro 5.2	CARATERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DA FACHADA.....	150
Quadro 5.3	CARATERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DAS EMPENAS DOS DESVÃOS DE COBERTURA	150
Quadro 5.4	VERIFICAÇÃO DA PRECISÃO DOS RESULTADOS DOS TERMOPARES TIPO T	169

CAPÍTULO VI APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS 171

Quadro 6.1	VALORES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS E DAS TEMPERATURAS DO AR ANTES E DEPOIS DA APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO TÉRMICO COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE.....	173
Quadro 6.2	TEMPERATURAS MÉDIAS E MÁXIMAS OBTIDAS QUANDO A TEMPERATURA DO AR EXTERIOR ULTRAPASSOU OS 35°C.....	179
Quadro 6.3	TEMPERATURAS MÉDIAS E MÁXIMAS OBTIDAS QUANDO A RADIAÇÃO SOLAR TOTAL HORIZONTAL ULTRAPASSOU OS 900 W/m ²	180
Quadro 6.4	TEMPERATURAS EXTERIORES, DO DESVÃO E DO QUARTO EM PERÍODOS CONTÍNUOS EM QUE A TEMPERATURA DO AR EXTERIOR ATINGIU VALORES ELEVADOS	181
Quadro 6.5	CARATERÍSTICAS DA TEMPERATURA EXTERIOR NOS PERÍODOS SELECIONADOS	184
Quadro 6.6	CARATERÍSTICAS DA RADIAÇÃO SOLAR NOS PERÍODOS SELECIONADOS	185
Quadro 6.7	TEMPERATURA DO AR NO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS	186
Quadro 6.8	VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR EXTERIOR FACE À DO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS	188
Quadro 6.9	COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA ABSOLUTA, ENTRE AS 8H E AS 20H, DO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS	189
Quadro 6.10	COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR EXTERIOR, ENTRE AS 8H E AS 20H, FACE À DO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS	189
Quadro 6.11	CARATERÍSTICAS DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DO TETO DO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS	191
Quadro 6.12	VALORES MÉDIOS DE TEMPERATURAS E HUMIDADES RELATIVAS DO AR DE 27/7/2011 A 7/8/2011	194
Quadro 6.13	VALORES MÁXIMOS E MÉDIOS DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS ESTEIRAS E DAS VERTENTES DE 27/7/2011 A 7/8/2011	195
Quadro 6.14	VALORES MÁXIMOS E MÉDIOS DOS FLUXOS DE CALOR DE 27/7/2011 A 7/8/2011.....	196
Quadro 6.15	VALORES MÁXIMOS E MÉDIOS DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DOS DESVÃOS DE COBERTURA E DOS QUARTOS DE 10/8/2011 A 23/8/2011.....	196
Quadro 6.16	VALORES MÁXIMOS E MÉDIOS DOS FLUXOS DE CALOR DE 10/8/2011 A 23/8/2011.....	197

Quadro 6.17	VALORES MÁXIMOS DA TEMPERATURA E VELOCIDADE DO VENTO EXTERIOR E DA TEMPERATURA RADIANTE DO DESVÃO ESTE DE 10/8/2011 A 23/8/2011.....	198
Quadro 6.18	VALORES MÁXIMOS E MÉDIOS DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS ESTEIRAS E DAS VERTENTES E DA TEMPERATURA RADIANTE NO DESVÃO ESTE DE 26/8/2011 A 30/8/2011.....	198
Quadro 6.19	VALORES MÁXIMOS E MÉDIOS DAS HUMIDADES RELATIVAS DO AR DOS QUARTOS, DESVÃOS DE COBERTURA E EXTERIOR DE 13/9/2011 A 18/9/2011	199
Quadro 6.20	VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS DOS FLUXOS DE CALOR NOS DESVÃOS DE COBERTURA DE 13/9/2011 A 18/9/2011.....	200
Quadro 6.21	VALORES MÍNIMOS, MÁXIMOS E MÉDIOS DAS TEMPERATURAS DO AR DOS QUARTOS E DESVÃOS DE COBERTURA DE 19/9/2011 A 26/9/2011.....	201
Quadro 6.22	VALORES MÍNIMOS, MÁXIMOS E MÉDIOS DAS HUMIDADES RELATIVAS DO AR DOS QUARTOS E DESVÃOS DE COBERTURA DE 19/9/2011 A 26/9/2011	202
Quadro 6.23	VALORES MÁXIMOS DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DOS QUARTOS E DESVÃOS DE COBERTURA DE 19/9/2011 A 26/9/2011.....	204
Quadro 6.24	VALORES MÁXIMOS DOS FLUXOS DE CALOR NOS DESVÃOS DE COBERTURA DE 19/9/2011 A 26/9/2011	205

CAPÍTULO VII	METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E OBTENÇÃO DE DADOS BASE	206
Quadro 7.1	ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DOS LOCAIS DE PORTUGAL CONSIDERADOS NAS SIMULAÇÕES	217
Quadro 7.2	ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DOS DOIS LOCAIS DA CPLP CONSIDERADOS NAS SIMULAÇÕES	221

CAPÍTULO VIII	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	232
Quadro 8.1	LOCAIS, PERÍODOS DE SIMULAÇÃO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR E TEMPERATURAS DO AR ATINGIDAS	243
Quadro 8.2	TEMPERATURAS PARA OS RESTANTES ESPAÇOS EM CONTACTO COM O QUARTO, EM PERÍODO DE MÁXIMAS TEMPERATURAS DO AR EXTERIOR	244
Quadro 8.3	LOCAIS, PERÍODOS DE SIMULAÇÃO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR E TEMPERATURAS DO AR ATINGIDAS	244
Quadro 8.4	TEMPERATURAS OPERATIVAS E DO AR NO CENÁRIO 8.2.1 NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	250
Quadro 8.5	TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA NO CENÁRIO 8.2.1 NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	251

Quadro 8.6 FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO NO CENÁRIO 8.2.1 NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	252
Quadro 8.7 TEMPERATURAS OPERATIVAS E DO AR NO CENÁRIO 8.2.1 NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	254
Quadro 8.8 TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA NO CENÁRIO 8.2.1 NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	254
Quadro 8.9 FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO NO CENÁRIO 8.2.1 NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	254
Quadro 8.10 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.2 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	256
Quadro 8.11 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.2 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	257
Quadro 8.12 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.2 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	258
Quadro 8.13 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.2 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	259
Quadro 8.14 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.2 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	259
Quadro 8.15 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.2 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	260
Quadro 8.16 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.3 FACE AO 8.2.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	261
Quadro 8.17 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.3 FACE AO 8.2.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	261
Quadro 8.18 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.3 FACE AO 8.2.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	262
Quadro 8.19 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.3 FACE AO 8.2.2, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	264
Quadro 8.20 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.3 FACE AO 8.2.2, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	264
Quadro 8.21 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.3 FACE AO 8.2.2, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	265
Quadro 8.22 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	266

Quadro 8.23 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	267
Quadro 8.24 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	268
Quadro 8.25 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	269
Quadro 8.26 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	270
Quadro 8.27 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	271
Quadro 8.28 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	272
Quadro 8.29 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.3, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	273
Quadro 8.30 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.3, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	273
Quadro 8.31 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.5 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	277
Quadro 8.32 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.5 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	278
Quadro 8.33 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.5 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	279
Quadro 8.34 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.5 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	279
Quadro 8.35 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.6 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	281
Quadro 8.36 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.6 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	282
Quadro 8.37 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.6 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	284
Quadro 8.38 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.6 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	284

Quadro 8.39 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.7 FACE AO 8.2.6, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	285
Quadro 8.40 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.7 FACE AO 8.2.6, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	286
Quadro 8.41 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	287
Quadro 8.42 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	288
Quadro 8.43 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	289
Quadro 8.44 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.4, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	290
Quadro 8.45 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.4, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	291
Quadro 8.46 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.4, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	292
Quadro 8.47 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	294
Quadro 8.48 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	294
Quadro 8.49 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	295
Quadro 8.50 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.4, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	295
Quadro 8.51 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.4, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	296
Quadro 8.52 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.4, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	296
Quadro 8.53 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.9 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	297
Quadro 8.54 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.9 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	298
Quadro 8.55 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.9 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	299

Quadro 8.56 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.9 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	301
Quadro 8.57 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.9 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	301
Quadro 8.58 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.9 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	302
Quadro 8.59 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.10 FACE AO 8.2.9, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	303
Quadro 8.60 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.10 FACE AO 8.2.9, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	304
Quadro 8.61 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.11 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	305
Quadro 8.62 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.11 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	306
Quadro 8.63 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.11 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	307
Quadro 8.64 TEMPERATURAS OPERATIVAS E DO AR NO CENÁRIO 8.3.1 NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	309
Quadro 8.65 TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA NO CENÁRIO 8.3.1 NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	310
Quadro 8.66 TEMPERATURAS OPERATIVAS E DO AR NO CENÁRIO 8.3.1 NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	311
Quadro 8.67 TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA NO CENÁRIO 8.3.1 NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	311
Quadro 8.68 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.2 FACE AO 8.3.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	312
Quadro 8.69 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.2 FACE AO 8.3.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	313
Quadro 8.70 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.3 FACE AO 8.3.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	314
Quadro 8.71 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.3.3 FACE AO 8.3.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	315
Quadro 8.72 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.3 FACE AO 8.3.2, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	316
Quadro 8.73 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.4 FACE AO 8.3.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	317

Quadro 8.74 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.5 FACE AO 8.3.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	318
Quadro 8.75 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.6 FACE AO 8.3.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	319
Quadro 8.76 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.3.6 FACE AO 8.3.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	320
Quadro 8.77 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.7 FACE AO 8.3.6, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	322
Quadro 8.78 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.8 FACE AO 8.3.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	323
Quadro 8.79 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.3.8 FACE AO 8.3.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	325
Quadro 8.80 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.3.8 FACE AO 8.3.3, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	326
Quadro 8.81 TEMPERATURAS OPERATIVAS E DO AR NO CENÁRIO 8.4.1 NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	327
Quadro 8.82 TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA NO CENÁRIO 8.4.1 NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	328
Quadro 8.83 TEMPERATURAS OPERATIVAS E DO AR NO CENÁRIO 8.4.1 NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	328
Quadro 8.84 TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA NO CENÁRIO 8.4.1 NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	329
Quadro 8.85 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.4.2 FACE AO 8.4.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	329
Quadro 8.86 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA DO QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.2 FACE AO 8.4.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	331
Quadro 8.87 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.2 FACE AO 8.4.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	333
Quadro 8.88 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.2 FACE AO 8.4.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	338
Quadro 8.89 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.4.3 FACE AO 8.4.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	340
Quadro 8.90 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA DO QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.3 FACE AO 8.4.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	341
Quadro 8.91 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.3 FACE AO 8.4.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	342
Quadro 8.92 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.3 FACE AO 8.4.2, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	344

Quadro 8.93 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.4 FACE AO 8.4.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	345
Quadro 8.94 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.5 FACE AO 8.4.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	347
Quadro 8.95 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.4.6 FACE AO 8.4.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	349
Quadro 8.96 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DO TETO DO QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.6 FACE AO 8.4.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	349
Quadro 8.97 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.6 FACE AO 8.4.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	350
Quadro 8.98 TEMPERATURAS OPERATIVAS NO CENÁRIO 8.5.1, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	352
Quadro 8.99 TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DO TETO FALSO NO CENÁRIO 8.5.1, E PARA, BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	353
Quadro 8.100 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE O TETO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.2 FACE AO 8.5.1, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	355
Quadro 8.101 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE O TETO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.3 FACE AO 8.5.2, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	357
Quadro 8.102 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE O TETO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.4 FACE AO 8.5.3, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	358
Quadro 8.103 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE O TETO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.5 FACE AO 8.5.1, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	360
Quadro 8.104 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE O TETO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.5 FACE AO 8.5.4, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	361
Quadro 8.105 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A FACHADA SUL E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.7 FACE AO 8.5.6, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR	363
Quadro 8.106 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A FACHADA SUL E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.8 FACE AO 8.5.8 INICIAL, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	365
Quadro 8.107 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A FACHADA SUL E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.8 FACE AO 8.5.8 INICIAL, E PARA MONTALEGRE, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	365

Quadro 8.108 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE O ENVIDRAÇADO SUL E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.9 FACE AO 8.5.7, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	367
Quadro 8.109 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS, DO CENÁRIO 8.5.10 FACE AO 8.5.7 P.E.0,03, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	371
Quadro 8.110 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE O TETO FALSO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.10 FACE AO 8.5.7 P.E.0,03, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	372
Quadro 8.111 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A FACHADA SUL E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.10 FACE AO 8.5.7 P.E.0,03, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	373
Quadro 8.112 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS, DO CENÁRIO 8.5.7 P.E. 0,03 FACE AO 8.5.1 P.E. 0,03, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR....	374
Quadro 8.113 VARIAÇÕES DOS FLUXO DE CALOR ENTRE O TETO FALSO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.7 P.E. 0,03 FACE AO 8.5.1 P.E. 0,03, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	375
Quadro 8.114 VARIAÇÕES DO FLUXO DE CALOR ENTRE A FACHADA SUL E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.10 FACE AO 8.5.7 P.E.0,03, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	375
Quadro 8.115 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS, DO CENÁRIO 8.5.10 FACE AO 8.5.7 P.E.0,03 E PARA MONTALEGRE, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	377
Quadro 8.116 VARIAÇÕES DO FLUXO DE CALOR ENTRE O TETO FALSO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.10 FACE AO 8.5.7 P.E.0,03, PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	377
Quadro 8.117 VARIAÇÕES DO FLUXO DE CALOR ENTRE A FACHADA SUL E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.10 FACE AO 8.5.7 P.E.0,03, PARA MONTALEGRE, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	378
Quadro 8.118 VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS, DO CENÁRIO 8.5.7 P.E. 0,03 FACE AO 8.5.1 P.E. 0,03, E PARA MONTALEGRE, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	379
Quadro 8.119 VARIAÇÕES DOS FLUXO DE CALOR ENTRE O TETO FALSO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.7 P.E.0,03 FACE AO 8.5.1 P.E.0,03, PARA MONTALEGRE, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR	380
Quadro 8.120 VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A FACHADA SUL, DO CENÁRIO 8.5.7 P.E.0,03 FACE AO 8.5.1 P.E.0,03, PARA MONTALEGRE, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR.....	380

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO, MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS GERAIS

Vários estudos empreendidos em diversas partes do Mundo, cujos aspetos mais significativos se apresentam no estado da arte e revisão bibliográfica deste trabalho, têm concluído que, sobretudo em períodos de Verão, em que a temperatura do ar exterior e a radiação solar são mais elevadas, os efeitos do uso de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade (ITRBEs), sobretudo no que concerne às coberturas, se traduz em significativos benefícios, sendo assim de ponderar o seu uso como complemento dos materiais tradicionais de isolamento térmico resistivo.

Este assunto, respeitante à utilização de ITRBEs, enquadra-se na tendência a que se assiste presentemente, de dotar as edificações, tanto as novas como as existentes, de melhores características de isolamento térmico da envolvente, no sentido de simultaneamente cumprir as exigências de conforto dos seus ocupantes, do uso racional de energia, da diminuição das emissões de gases que provocam o efeito estufa e da minoração das patologias da construção, integrando-se, assim, esta temática, por inerência, no processo de certificação energética de edifícios, cuja aplicação a todos os edifícios previstos na Lei ocorreu a partir de janeiro de 2009, bem como no atual processo de desenvolvimento das características dos edifícios de consumo energético quase zero (nZEB), que obrigatoriamente se aplicará a todos os edifícios novos a partir de janeiro de 2021, sendo que para os edifícios públicos essa obrigação está prevista já para 1 de janeiro de 2019.

Akutsu (1998) refere que a grande disponibilidade de energia, devido à evolução da tecnologia, contribuiu enormemente para a quebra da harmonia existente entre os edifícios e o ambiente que os rodeia, provocando, assim, um desequilíbrio que, com o aumento do preço da energia e com a escassez de recursos não renováveis, tornará esta situação insustentável.

Sabendo-se que grande parte das trocas de calor se processa pela cobertura dos edifícios e que nestas, e sobretudo no verão, a transferência de calor por radiação pode ser muito significativa dadas as altas temperaturas atingidas pelos materiais, entendeu o autor ser um objeto de estudo interessante e pertinente a aplicação, sobretudo em coberturas, mas também nas paredes e envidraçados, de isolamento térmicos que atuam sobretudo na minoração da transferência de calor por radiação.

Apesar destas técnicas já serem vulgarmente usadas noutras áreas da ciência e da tecnologia, desde o desenvolvimento da simples garrafa *Thermos* até ao mais sofisticado da indústria aeroespacial, a verdade é que, com exceção de alguns países em que a aplicação, em edifícios, de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade tem sido alvo de investigação, normalização e operacionalização, de uma forma geral, continuam a ter enormes dificuldades em se assumirem como uma solução corrente para a construção nova ou para a reabilitação térmica de edifícios.

As dificuldades em avaliar as vantagens reais da aplicação de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade nos edifícios, que inclusivamente provocam a situação destes materiais não possuírem facilmente a necessária marcação CE (sendo neste caso necessário a existência de uma ETA – Aprovação Técnica Europeia), bem como o facto da maior parte da legislação térmica estar concebida no sentido da aplicação de materiais de isolamento resistivos, são das principais razões para os grandes bloqueios na aplicação mais corrente deste tipo de materiais de isolamento nas envolventes dos edifícios.

Adiciona-se aos problemas anteriores, as polémicas em torno de aspetos ligados a interesses comerciais de cota de mercado entre os produtores dos tradicionais materiais resistivos e os produtores destes materiais não tradicionais caracterizados pela sua baixa emissividade e elevada refletividade. Estas polémicas, inclusivamente, provocaram pelo menos um grande processo judicial, instaurado contra um organismo público Britânico, situação que é referenciada no Capítulo IV.

Deste modo, este assunto tinha e tem todos os ingredientes para suscitar o interesse conducente a uma investigação profunda por parte do autor, que ao longo dos anos da sua

vida profissional e académica se tem dedicado exatamente à temática do comportamento térmico dos edifícios.

Este interesse pela temática da emissão de radiações, e dos materiais que lhes podem servir de barreira, é algo que já acompanha o autor desde os tempos de infância, sobretudo devido à sua atração por tudo o que tem a ver com a investigação aeroespacial. A constatação que é possível a um astronauta manter a temperatura vital, mesmo em condições térmicas muito agressivas, devido aos fatos que usa e que contêm materiais refletantes e de baixa emissividade, ou mesmo a constituição das naves espaciais que também usam estes materiais para bloquearem grande parte das radiações que as atingem, foi sempre algo que prendeu a atenção do autor. Igualmente, a relação do autor, desde infância, com as garrafas *Thermos* e ao “mistério” de como estas mantêm a temperatura dos líquidos nela existentes e ao facto de um dia ter visto uma dessas garrafas partida, podendo analisar a constituição do seu interior, não será com certeza igualmente alheio à curiosidade e interesse que este assunto sempre lhe suscitou.

Foi muito depois destes tempos de infância, que o autor já no desenvolvimento da sua atividade como engenheiro civil, e em conversa com um conhecido Professor de Engenharia, que vem citado nos agradecimentos inseridos no início deste trabalho, voltou a interessar-se muito por este tema mas já com a focalização na aplicação destas técnicas aos edifícios, no sentido do desenvolvimento das respetivas condições de conforto térmico. Da citada conversa e fruto das diligências do referido Professor, passou-se rapidamente para uma reunião com o Diretor de uma empresa produtora de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade, objeto igualmente de agradecimentos no início deste trabalho, que sedimentou o interesse do autor nesta área do conhecimento.

De imediato o autor pediu uma reunião com a sua orientadora da dissertação que tinha desenvolvido no âmbito do mestrado em construção de edifícios da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, de forma a colocar-lhe esta proposta de tese de doutoramento e solicitar a sua orientação, situação que foi de imediato aceite e da qual o autor igualmente agradece no início deste trabalho.

1.2 ORGANIZAÇÃO E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

De forma a se compreender melhor a constituição deste trabalho, de seguida será realizada uma abordagem específica dos vários capítulos em que resumidamente se indicará os respetivos objetivos.

1.2.1 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO II - FÍSICA DAS RADIAÇÕES E TRANSFERÊNCIA DE CALOR

- a) Identificar as várias radiações do espectro eletromagnético bem como explicitar o modo como foram descobertas, quais as suas características e ações principais;
- b) Explicar processos de proteção em relação aos vários tipos de radiações;
- c) Identificar e explicar as várias formas de transferência de calor, com maior desenvolvimento no respeitante à transferência por radiação.

1.2.2 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO III – SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO

- a) Definir e explicar o conceito mais geral de isolamento térmico;
- b) Explicar as características e funcionamento dos isolamentos térmicos resistentes;
- c) Explicar as características e funcionamento dos isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade;
- d) Apresentar os vários tipos de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade, diferenciando a sua constituição, características próprias e metodologia de aplicação em obra, incluindo-se aqui o reaproveitamento de determinadas embalagens.

1.2.3 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO IV – ESTADO DA ARTE E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- a) Fazer um levantamento da investigação já realizada nesta área a nível Nacional e Internacional;
- b) Resumir os resultados mais significativos, explicando as conclusões a que os diversos investigadores chegaram;

- c) Verificar que aspetos desses estudos poderão ter interesse replicar e adaptar para o caso Português e que áreas conexas de conhecimento carecem ainda de uma investigação mais profunda.

1.2.4 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO V – DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO E DA METODOLOGIA DE ENSAIO

- a) Descrever os casos reais de estudo utilizados na investigação;
- b) Apresentar os objetivos particulares do estudo;
- c) Explicar a metodologia seguida na investigação bem como os equipamentos usados;
- d) Explicar o processo de funcionamento e de ligação de toda a instrumentação utilizada.

1.2.5 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO VI – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

- a) Apresentar e analisar os resultados obtidos numa só cobertura em períodos distintos e integrando sistemas de isolamento térmico diferentes;
- b) Apresentar e analisar os resultados obtidos simultaneamente em duas coberturas, cada uma integrando sistemas de isolamento térmico diferentes.

1.2.6 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO VII – METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E OBTENÇÃO DE DADOS BASE

- a) Explicar as características e processo geral de funcionamento do programa de simulação numérica usado (CAPSOL);
- b) Explicar o procedimento desenvolvido para a obtenção dos ficheiros climáticos usados no CAPSOL;
- c) Explicar o procedimento de determinação experimental da emissividade das superfícies dos materiais considerados nos vários cenários simulados numericamente com recurso ao CAPSOL.

1.2.7 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO VIII – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

- a) Comparar os resultados experimentais com os resultados da simulação numérica e assim validar o procedimento seguido na utilização do CAPSOL;

- b) Estudar, através do uso do CAPSOL, em vários cenários, o comportamento térmico relativo ao uso de ITRBEs, comparando com a não colocação de qualquer isolamento e com a colocação alternativa ou conjunta de isolamentos térmicos resistivos;

1.2.8 OBJETIVOS INERENTES AO CAPÍTULO IX – CONCLUSÕES

- a) Enumerar as conclusões mais importantes que se retiraram deste trabalho;
- b) Elencar possíveis desenvolvimentos futuros deste estudo.

1.3 METODOLOGIAS E TÉCNICAS USADAS

Este trabalho desenvolveu-se ao longo das seguintes etapas:

- a) Pesquisa bibliográfica sobre física das radiações e transferência de calor, sobretudo na componente de transferência por radiação;
- b) Pesquisa bibliográfica sobre técnicas de limitação da transferência de calor por radiação;
- c) Ligação a uma empresa do setor que produz isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade em que existiu o contato direto com o processo de fabrico das mesmas e com as dificuldades e oportunidades do setor;
- d) Pesquisa bibliográfica sobre trabalhos de investigação na área da aplicação de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade em edifícios bem como contacto com os respetivos autores;
- e) Elaboração de um catálogo técnico e maqueta de exposição para a empresa do setor que produz isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade, aplicando os conhecimentos entretanto adquiridos;
- f) Conceção e acompanhamento da obra dos novos escritórios da empresa do setor que produz isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade, em que o material de isolamento aplicado na cobertura e nos tetos falsos foi exatamente o material em estudo;
- g) Seleção de um edifício a ser instrumentado para realizar estudos comparativos de comportamento de coberturas antes e depois da aplicação de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade;

- h) Ensaios efetuados, em dois verões, no edifício selecionado, usando materiais e técnicas de ensaio diferenciados;
- i) Tratamento dos dados obtidos nos ensaios realizados;
- j) Identificação das principais conclusões após análise dos resultados experimentais tratados;
- k) Estudo de vários programas de simulação numérica e seleção de um deles cujas características permitam responder eficazmente às solicitações do estudo pretendido;
- l) Após quatro anos de aplicação dos ITRBEs no edifício submetido a ensaios experimentais, retiraram-se amostras deste isolamento com pó depositado nas suas superfícies, de modo a poder avaliar a influência destes depósitos no comportamento térmico destes isolamentos;
- m) Obtenção dos dados de base necessários para a simulação numérica com recurso ao programa informático selecionado, com relevância para os dados climáticos dos vários locais e para as emissividades das superfícies dos vários materiais considerados, com relevância para os ITRBEs com e sem acumulação de pó e sujidades;
- n) Validação dos procedimentos a seguir na simulação numérica com recurso ao programa informático selecionado (CAPSOL), pela comparação dos seus resultados com os obtidos experimentalmente;
- o) Simulação numérica de vários cenários com recurso ao CAPSOL;
- p) Identificação das principais conclusões após análise dos resultados da simulação numérica com recurso ao CAPSOL;
- q) Redação do presente documento.

CAPÍTULO II

FÍSICA DAS RADIAÇÕES E TRANSFERÊNCIA DE CALOR

2.1 ENQUADRAMENTO

Devido ao facto, de que os isolamentos térmicos objeto do presente estudo, atuarem sobretudo na minoração da transferência de calor por radiação, achou o autor pertinente desenvolver no presente capítulo, não só a abordagem do tipo de radiações existentes e respetivas propriedades, em especial aquelas que são responsáveis pela radiação térmica, mas também, e em seguida, a análise das formas de transferência de calor, em especial a relativa à referida radiação.

2.2 NATUREZA DA LUZ

O conhecimento da natureza da luz sempre foi algo que ao longo dos tempos intrigou os espíritos mais curiosos, sendo pois alvo de inúmeras pesquisas científicas. Na antiga Grécia acreditava-se que a luz era constituída por pequeníssimos grãos cuja constituição era diferente da matéria corrente (Webber e Ricci, 2006).

O modelo corpuscular da luz foi cientificamente apresentado em 1672 pelo físico Britânico Isaac Newton (1643-1727), enquanto o modelo ondulatório foi apresentado pela primeira vez em 1670 pelo físico neerlandês Cristian Huygens (1629-1695). Ambos explicavam certos fenómenos da luz como a refração e a reflexão (Courrol e Preto, 2010).

Foi somente com as experiências realizadas sobre interferência pelo físico e médico Britânico Thomas Young (1773-1829) e pelo Físico Francês Augustin Fresnel (1788-1827), bem como das experiências sobre a medição da velocidade da luz em líquidos, executadas pelo físico Francês Jean León Foucault (1819-1868) que se demonstrou que a teoria corpuscular não podia explicar os respetivos resultados, mas a teoria ondulatória já o conseguiria. Na segunda metade do século XIX o físico Britânico James Clerk Maxwell (1831-1879), usando a sua

teoria ondulatória, provou teoricamente que as ondas eletromagnéticas se propagavam no espaço com uma velocidade igual à velocidade da luz, concluindo assim que na verdade a luz se comporta como uma onda eletromagnética (Courrol e Preto, 2010). Posteriormente, o físico Alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), conseguiu provar, já experimentalmente, que a radiação eletromagnética é a conjugação de um campo elétrico com um campo magnético que se propagam ao mesmo tempo, perpendicularmente um ao outro e ambos perpendiculares à direção de propagação da onda.

Já em 1905 o físico teórico Alemão Albert Einstein (1879-1955) no seguimento de estudos realizados pelo também físico Alemão Max Planck (1858-1947) concluiu que a teoria eletromagnética não conseguia explicar o efeito fotoelétrico. Para a explicação desse efeito Einstein desenvolveu a teoria que a luz era constituída por fótons. Esta natureza corpuscular da luz foi posteriormente confirmada experimentalmente pelo físico Americano Arthur Holly Compton (1892- 1962).

Atualmente, aceita-se que a natureza da luz é dual, ou seja tanto é um corpúsculo ou partícula como é uma onda, pois alguns fenômenos da luz, como a polarização, a difração e a interferência, são explicados pela teoria ondulatória, enquanto outros, como o efeito fotoelétrico, são explicados pela teoria corpuscular (Webber e Ricci, 2006). A luz é emitida quando existe libertação de energia dos átomos e que depende da temperatura dos corpos, sendo pois uma medida da energia interna dos mesmos.

2.3 ESPETRO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A palavra espectro (do latim "spectrum", que significa imagem, fantasma ou aparição) foi usada por Isaac Newton, no século XVII, para descrever a faixa de cores resultante da sua experiência de refração da luz solar através de um prisma de vidro. Grande parte da radiação, como é o caso da radiação térmica dos infravermelhos, é emitida devido a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que integram a matéria. É aceite que a energia associada a essa radiação é transmitida através de ondas eletromagnéticas ou de fótons (Incropera e DeWitt, 1998). Como já foi referido, a luz tem um comportamento de uma onda eletromagnética, sendo que quanto menor for o comprimento de onda maior é a energia associada. Dentro do espectro de radiações, a mais energética é a radiação cósmica. Na Figura

2.1 apresenta-se o espectro completo da radiação eletromagnética por intervalos de comprimento de onda, alertando-se que os limites para cada faixa são aproximados.

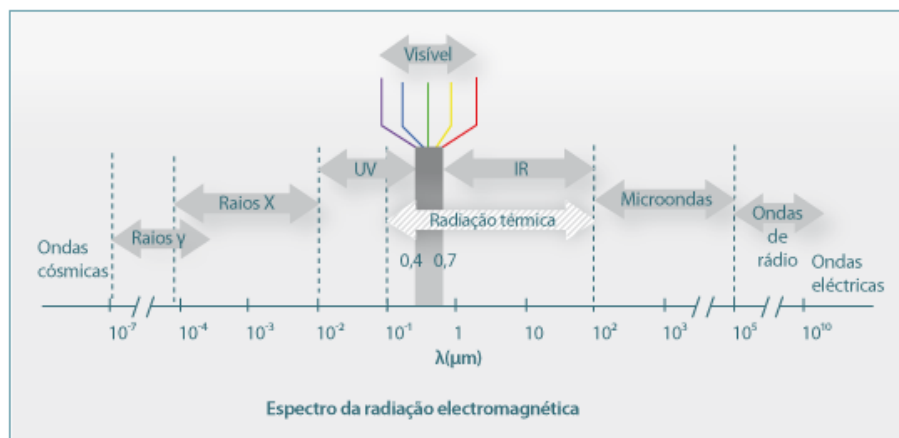


Figura 2.1

ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

(Portal Laboratórios Virtuais de Engenharia Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. [Em linha]. Disponível em <http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=248&Itemid=422>)

Os comprimentos de onda do espectro são pois muito variáveis, podendo por exemplo atingir-se a ordem de grandeza do tamanho do núcleo atómico, que é o caso de certos raios gama, como a ordem de grandeza de um estádio de futebol, sendo este o caso de certas ondas de rádio. De referir que ainda não se detém o conhecimento completo do limite da energia que a radiação pode integrar, daí o espectro apresentado começar por apresentar do lado dos menores comprimentos de onda, as designadas ondas cósmicas, ou também chamada de radiação cósmica, que ainda é alvo de intensas investigações sobre toda a extensão da sua natureza.

Grande parte destas radiações eletromagnéticas não consegue chegar à superfície da Terra devido ao escudo protetor que é a sua atmosfera, em especial a sua camada mais superior designada por termosfera. É relevante referir, que é possível visualizar todo o espectro eletromagnético através de câmaras próprias, permitindo-se assim ver para além das capacidades do Ser-Humano que está confinado à faixa da luz visível.

Do espectro total da radiação, a parte que é associada à transferência de calor, conhecida por radiação térmica, situa-se aproximadamente entre os 0,1 e os 100 μm de comprimento de onda, integrando parte da radiação ultravioleta e toda a radiação visível e infravermelha.

2.4 INTERAÇÃO DA ENERGIA ELETROMAGNÉTICA COM OS CORPOS

A Figura 2.2 mostra como é que a energia incidente num corpo se transforma numa parcela de energia refletida, noutra de energia absorvida e ainda numa outra transmitida. Em relação à energia absorvida, esta geralmente é reemitida em diversos comprimentos de onda.

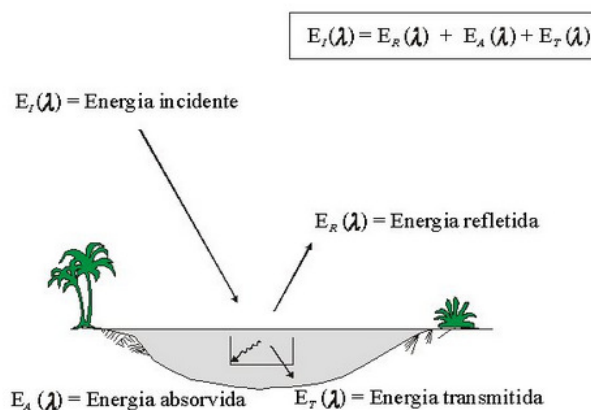


Figura 2.2
 INTERAÇÃO DA ENERGIA ELETROMAGNÉTICA COM A SUPERFÍCIE DA TERRA
 (Universidade do Estado do Rio de Janeiro. [Em linha]. Disponível em <
http://www.labgis.uerj.br/gis_atualizada/sensoriamento/onda.html >)

As chamadas janelas atmosféricas são regiões do espectro em que a atmosfera se deixa atravessar pela radiação eletromagnética, sendo que a energia da radiação eletromagnética que chega à Terra está aproximadamente distribuída de acordo com o Quadro 2.1.

Quadro 2.1
 NATUREZA DA ENERGIA ELETROMAGNÉTICA QUE CHEGA À SUPERFÍCIE DA TERRA
 (Universidade Federal do Rio Grande do Sul. [Em linha]. Disponível em
 <http://www.fismed.ufrgs.br/sol_efeitos.htm>)

RaiosUVB (0,1% da energia eletromagnética que chega à Terra)	290 - 320 nm
Raios UVA (4,9% da energia eletromagnética que chega à Terra)	320 - 400 nm
Luz visível (40% da energia eletromagnética que chega à Terra)	400 - 700 nm
Infravermelhos (55% da energia eletromagnética que chega à Terra)	700 -3000 nm

Verifica-se, pois, em termos energéticos a relevância da radiação infravermelha, sendo esta radiação a grande responsável pelo transporte do calor, que é energia em trânsito.

Esta energia ao chegar à superfície da Terra é em grande parte absorvida, sendo que depois se volta a irradiar para a atmosfera a maioria dessa energia em forma de ondas de baixa frequência, em especial na parte do espectro dos infravermelhos de maior comprimento de onda, mais afastados pois da luz visível, devido ao facto da temperatura da Terra ser substancialmente mais baixa do que a do Sol. A existência de dióxido de carbono e vapor de água na baixa atmosfera, faz com que essa radiação seja absorvida e reemitida outra vez para a Terra, provocando assim o chamado efeito de estufa (Figura 2.3), que permite que a Terra possua uma temperatura adequada para o desenvolvimento de vida animal e vegetal, pois caso assim não fosse a temperatura da terra seria cerca de -18°C (Hewitt, 2002).



Figura 2.3
EFEITO DE ESTUFA TERRESTRE
(Hewitt, 2002)

O nome deste efeito teve como base o fenómeno semelhante que acontece nas estufas agrícolas. Nestas, o vidro (e vários plásticos) é transparente à radiação visível mas praticamente opaco a alguma da radiação ultravioleta (pois abaixo de determinado comprimento de onda esta radiação é absorvida pelo vidro) bem como aos infravermelhos. A radiação da luz visível ao passar pelo vidro incide nas superfícies interiores da estufa, nomeadamente no solo e plantas, que absorvem essa radiação e que depois emitem infravermelhos com comprimento de onda longo que não consegue atravessar o vidro, aquecendo assim o interior da estufa (Figura 2.4).



Figura 2.4
EFEITO DE ESTUFA EM CONSTRUÇÕES AGRÍCOLAS
(Hewitt, 2002)

Para explicar a temperatura mais elevada que ocorre nas estufas, não se pode menosprezar igualmente o facto que a envolvente da estufa funciona como uma barreira à perda de calor por convecção (Hewitt, 2002).

2.5 LUZ VISÍVEL

Em relação ao que normalmente se chama de luz, na prática representa a gama de comprimentos de onda a que a retina do olho humano, devido a serem estimuladas determinadas reações químicas, tem sensibilidade, e que se situa aproximadamente, visto existirem diferenças entre as pessoas, entre $0,4 \mu\text{m}$ (400nm) e $0,8 \mu\text{m}$ (800nm). A impressão de cor é algo intrínseco à maneira como o Ser-Humano reage ao estímulo eletromagnético e o processa eletroquimicamente através do seu sistema visual, que transmite a informação ao cérebro. A radiação mais intensa emitida pelo Sol situa-se exatamente na faixa do espectro da radiação visível, tendo o seu pico sensivelmente para a frequência de $0,55 \mu\text{m}$ (zona da cor verde). Deste modo, pode-se concluir, que ao longo da evolução do Ser -Humano o aparelho visual adaptou-se ao espectro solar (Cassol, 2009).

A luz visível pode ser originada de diversas formas, como é o caso da incandescência, em que a radiação térmica originada por corpos sujeitos a temperaturas superiores a 1000°C torna-se visível, como é o caso do Sol ou das lâmpadas incandescentes. No Quadro 2.2 indicam-se os intervalos de comprimento de onda e frequência correspondentes a cada cor.

Quadro 2.2
FREQÜÊNCIAS E COMPRIMENTOS DE ONDA PARA VÁRIAS CORES NO VAZIO
(Adaptado do Departamento de Física da Universidade de Coimbra. [Em linha]. Disponível em
<http://nautilus.fis.uc.pt/wwwfi/hipertextos/espectro/hiper_espectro_vis.html>)

Cor	Comprimento de onda (nm)	Frequência (10^{12} Hz)
vermelho	622-780	384 - 482
laranja	597-622	482 - 503
amarelo	577-597	503 - 520
verde	492-577	520 - 610
azul	455-492	610 - 659
violeta	390-455	659 - 769

Os espectros de emissão dos corpos incandescentes dependem da temperatura a que os mesmos estão submetidos, daí ser frequente designá-los por espectros térmicos, sendo que quanto maior for a temperatura a que o corpo está submetido mais energéticas serão as radiações emitidas.

2.6 RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

A radiação infravermelha foi detetada pela primeira vez em 1800 pelo astrónomo e músico Alemão nacionalizado Inglês Sir William Herschel (1738-1822) (Borges, 2008). Herschel ao usar um termómetro de mercúrio para medir a temperatura correspondente a cada cor resultante da dispersão da luz branca através de um prisma de cristal concluiu que a temperatura era maior na zona não visível adjacente ao espectro correspondente à cor vermelha (batizada de infravermelhos, por corresponder a frequências imediatamente inferiores às da cor vermelha) e que deste modo existia mais radiação para além da visível. Na Figura 2.5 mostra-se este resultado relativo a uma experiência que retrata a original de Herschel.

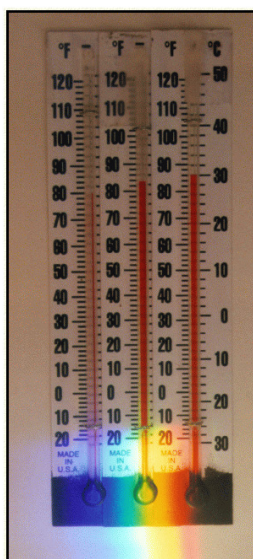


Figura 2.5

EXPERIÊNCIA DE HERSCHEL

(NASA-IPAC. [Em linha]. Disponível em

<http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/classroom_activities/herschel_experiment.html>)

Com esta experiência evidencia-se cumulativamente que a faixa do espectro eletromagnético correspondente à radiação térmica, além da faixa dos infravermelhos, também engloba a faixa da luz visível (e parte da ultravioleta). A energia molecular associada à radiação infravermelha é sobretudo vibracional. Qualquer corpo que esteja a uma temperatura acima dos 0 graus Kelvin, ou seja acima do zero absoluto, emite radiação infravermelha, ou seja em baixas frequências e em forma de calor (Borges, 2008). Os seres vivos, como o Ser-Humano, percebem tais radiações devido ao facto de serem dotados na superfície do seu corpo de células com terminações nervosas sensíveis a estímulos térmicos. No entanto, existem animais, como o caso da serpente cascavel, que inclusivamente têm sensibilidade visual à radiação infravermelha conseguindo assim se guiar e caçar presas durante a noite.

A região do infravermelho estende-se aproximadamente entre os 0,7 μm e os 100 μm (Incropera e DeWitt, 2008) e é normalmente subdividida em três regiões de acordo com a proximidade à radiação visível pelo Ser-Humano: os Infravermelhos próximos (do visível), os infravermelhos intermédios, e os infravermelhos longínquos.

É frequente existirem algumas diferenças na definição dos limites das várias radiações infravermelhas. Uma outra classificação é considerada pelo Internacional Lighting Vocabulary of CIE – Commission Internationale de L'Éclairage, em que este organismo separa a radiação infravermelha em IR-A, IR-B e IR-C (Quadro 2.3).

Quadro 2.3

CLASSIFICAÇÃO E INTERVALO ESPETRAL DAS RADIAÇÕES INFRAVERMELHAS SEGUNDO O CIE (Santos, 2006)

Região (abreviação)	Faixa de Comprimento de Onda
IR-A	0,78 μm – 1,4 μm
IR-B	1,4 μm – 3 μm
IR-C	3 μm – 1000 μm

Quanto maior for a temperatura de um corpo, maior é a energia associada à radiação emitida. Apresentando o Sol uma temperatura média da sua superfície exterior da ordem dos 6000 graus Kelvin e a Terra da ordem dos 288 graus Kelvin implica tal que os comprimentos de onda associados à radiação solar são menores (frequências de onda maiores) do que os associados à radiação da Terra (frequências de onda menores) (Figura 2.6).

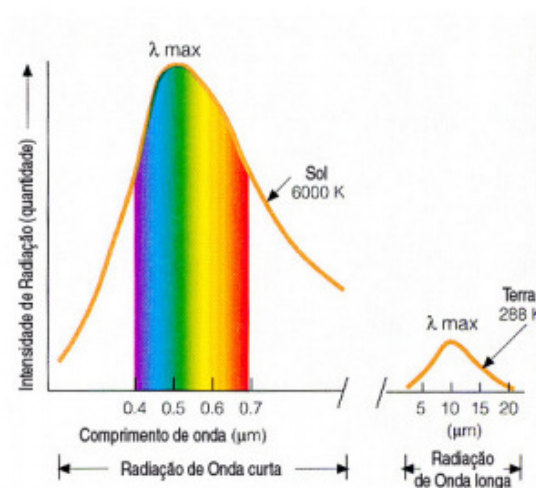


Figura 2.6
ESPECTRO DE RADIAÇÃO DO SOL E DA TERRA
Proclira (2007)

Verifica-se, que em termos de comprimentos de onda, a radiação solar ocupa a faixa espectral de 100 nm a 3.000 nm (3 μm), tendo uma máxima densidade espectral em torno dos 550 nm, comprimento de onda que corresponde sensivelmente à luz verde-amarelada, enquanto a Terra possui uma máxima intensidade de radiação nos 10.000 nm, já pois no domínio do espectro dos infravermelhos.

2.7 RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

Foi em 1801 que o Físico e Químico Alemão Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) descobriu a radiação ultravioleta (Borges, 2008). Entusiasmado com a descoberta da radiação infravermelha, Ritter intuiu que existiria uma simetria no espectro da radiação eletromagnética e como tal decidiu investigar a existência de um outro tipo de radiação não visível do lado oposto do espectro, ou seja do lado da faixa do violeta, para comprimentos de onda menores. Ritter ao fazer incidir o espectro da luz solar num papel embebido em cloreto de prata, substância que escurece em presença da radiação solar, identificou que na zona do espectro violeta o escurecimento produzido era maior que na zona do vermelho e que na parte invisível do espectro para comprimentos de onda imediatamente inferiores ao violeta o escurecimento ainda era mais intenso.

A descoberta da radiação UV abaixo dos 200 nm só foi realizada em 1893 pelo físico Alemão Victor Schumman (1841-1913) e foi designada por *ultravioleta de vácuo* pois esta radiação sofre grande absorção pelo ar atmosférico. Quanto menor for o comprimento de onda, maior a frequência e como tal maior a energia associada. Assim, os ultravioletas que seriam mais nefastos para o corpo humano seriam os UV-Extremos e os UV-C, mas felizmente não chegam a atingir a Terra devido à proteção conferida pela atmosfera, em especial pela camada de ozono. Deste modo, os que efetivamente acabam por ser mais perigosos para o Ser Humano são os UV-B, embora os UV-A também possam provocar consequências muito negativas. A grande maioria da luz ultravioleta que atinge a superfície terrestre é do tipo A.

É relevante referir que os ultravioletas pelo seu poder energético são utilizados para a esterilização de alguns produtos e que a visão Humana embora não seja sensível à radiação ultravioleta, o mesmo não acontece com certos animais como por exemplo os pombos e as abelhas que utilizam estas radiações para se orientarem (Borges, 2008).

2.8 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

2.8.1 CONDUÇÃO

Foi o Físico Francês Jean Baptiste Joseph, barão de Fourier (1768-1830) que em 1822 e na sequência de experiências que encetou, definiu a transferência de calor num regime estacionário, que ficou conhecida como a Lei de Fourier. Sendo x a única direção em que ocorre transferência de calor, o fluxo respetivo, segundo a Lei de Fourier, pode escrever-se a partir da seguinte equação:

$$\frac{q_x}{A} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad [2.1]$$

Em que:

$\frac{q_x}{A}$: Fluxo de calor na direção x que atravessa determinado meio infinitesimal de área superficial A e espessura ∂x (W/m^2);

λ : Coeficiente de condutibilidade térmica do meio atravessado ($\text{W}/(\text{m.K})$);

∂T : Diferencial de temperatura entre as superfícies que delimitam o meio infinitesimal, sendo numericamente igual à diferença entre a temperatura mais baixa e a mais alta (K).

O sinal negativo da equação [2.1] faz com que $\frac{q_x}{A}$ seja uma grandeza positiva quando o fluxo ocorre no sentido crescente dos xx e a temperatura diminui nesse mesmo sentido.

Reconhecendo que o fluxo de calor é uma grandeza vetorial, e supondo as hipóteses de homogeneidade e isotropia do material relativamente à condutibilidade térmica (λ), a equação [2.1] pode ser generalizada à situação em que existem diferenciais de temperatura (∂T) nas três direções do espaço x , y e z , existindo, assim, três componentes do fluxo de calor segundo um referencial ortonormado O_{xyz} :

$$\frac{\vec{q}}{A} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T = -\lambda \nabla T = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \right) \quad [2.2]$$

Para a resolução de problemas associados à transferência de calor por condução, é necessária a consideração de uma equação geral que relacione os fluxos de calor que atravessam cada ponto do corpo com a taxa de variação da sua energia interna (Rodrigues; Piedade e Braga, 2009). Utilizando o princípio da conservação da energia pode-se concluir que a taxa de variação com o tempo da energia interna do elemento considerado é igual ao balanço líquido dos fluxos de calor que atravessam esse elemento (diferença entre o fluxo de energia que entra e o fluxo de energia que sai) mais a taxa de geração interna de calor. Este princípio pode então ser traduzido matematicamente por:

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial (\lambda \frac{\partial T}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial (\lambda \frac{\partial T}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial (\lambda \frac{\partial T}{\partial z})}{\partial z} + \dot{q} \quad [2.3]$$

Em que:

ρ : Densidade do meio atravessado (kg/m^3);

C_p : Calor específico do meio atravessado ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$);

\dot{q} : Geração de calor por unidade de volume no meio atravessado (W/m^3).

Pode-se simplificar a equação [2.3] na situação de se considerar que a condutibilidade térmica é constante e que não existe geração interna de calor, deste modo:

$$\frac{\rho C_p}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad [2.4]$$

ou ainda:

$$\frac{1}{\alpha'} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad [2.5]$$

Em que: $\alpha' = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ (m^2/s) é designado por difusibilidade térmica do meio.

2.8.2 CONVECÇÃO

De uma forma simplificada é comum calcular a transferência de calor por convecção utilizando a Lei de arrefecimento de Newton, que se aplica somente para pequenas diferenças de temperatura (Universidade do Minho. [Em linha]. Disponível em <

<http://online.uminho.pt/pessoas/lanceros/Material%20LEGI/Material%20-%20LEGI/Termo din%C3%A2mica-I.pdf>). Num regime estacionário, esta Lei pode ser escrita do seguinte modo:

$$\frac{q}{A} = h' (T_s - T_\infty) \quad [2.6]$$

em que:

$\frac{q}{A}$: Fluxo de calor trocado entre a superfície de área A de um corpo sólido e um fluido (W/m^2);

h' : Coeficiente de convecção ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$);

A_s : Área da superfície transversal à direção do fluxo (m^2);

T_s : Temperatura da superfície do corpo (K);

T_∞ : Temperatura do fluido (K).

A lei anterior basicamente refere que a taxa de arrefecimento de um corpo é proporcional à diferença de temperatura entre esse corpo e o ambiente que o rodeia, sendo válida tanto para o aquecimento do corpo como para o arrefecimento. Esta lei que aparenta simplicidade, encerra no entanto toda a sua complexidade na determinação do coeficiente de convecção h' .

2.8.3 RADIAÇÃO

2.8.3.1 Radiosidade

A radiação, como já foi referido, pode ser considerada como sendo a propagação de ondas eletromagnéticas. Este fenómeno pode ser superficial no caso de substâncias sólidas ou líquidas ou pode ser volumétrico no caso de substâncias gasosas e sólidas semitransparentes (Incropera e DeWitt, 2008). No entanto a abordagem apresentada de seguida diz respeito ao fenómeno que ocorre em superfícies. A intensidade de radiação emitida a partir de uma área diferencial está associada a um ângulo sólido, sendo daí necessário usar coordenadas esféricas para proceder aos respetivos cálculos para a determinação do seu valor (Figura 2.7).

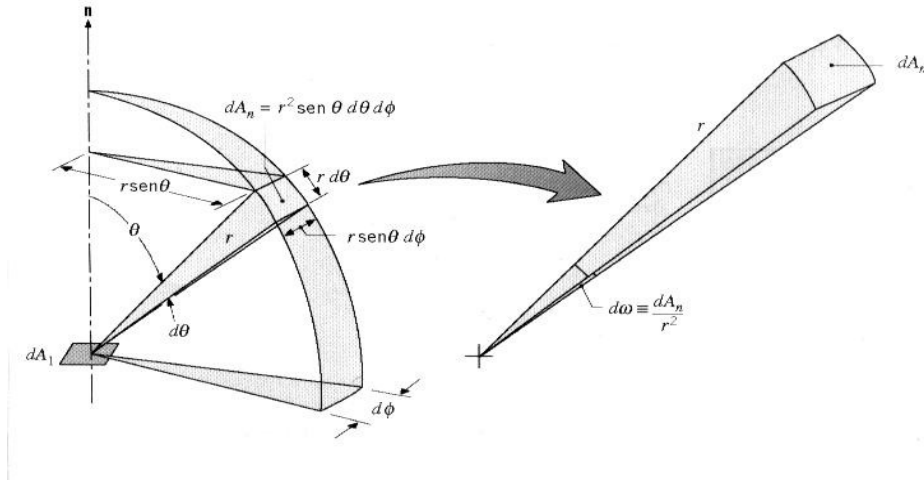


Figura 2.7
EMIÇÃO DA RADIAÇÃO ASSOCIADA A UM ÂNGULO SÓLIDO
(Incropera e DeWitt, 2008)

A radiação pode então ser emitida em qualquer direção do espaço definido por um hemisfério imaginário sobre a superfície considerada. Por integração de dW para os limites de Φ de 0 a 2π e de θ de 0 a $\frac{\pi}{2}$ obtém-se o ângulo sólido associado à totalidade do hemisfério, medido em estereorradianos (sr).

$$\int_h d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \text{sen}\theta d\theta d\phi = 2\pi \int_0^{\pi/2} \text{sen}\theta d\theta = 2\pi \text{ sr} \quad [2.7]$$

A radiação emitida por dA_1 e que passa através de dA_n , designada por intensidade espectral $I_{\lambda,e}$, medida em $W/(m^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu m)$, pode-se então definir como sendo a taxa de energia de radiação que é emitida com comprimento de onda λ nas direções Φ e θ de propagação, por unidade de área da superfície emissora normal a essa direção, por unidade de ângulo sólido e por unidade de intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ ao redor dessa direção.

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \equiv \frac{dq}{dA_1 \cdot \cos\theta \cdot d\omega \cdot d\lambda} \quad [2.8]$$

Sendo $\frac{dq}{d\lambda} \equiv dq_\lambda$ taxa, medida em $W/\mu m$, relativa à radiação de comprimento de onda λ que deixa dA_1 e passa através de dA_n , pode-se escrever a equação [2.8] do seguinte modo:

$$dq_{\lambda} = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cdot dA_1 \cdot \cos \theta \cdot d\omega \quad [2.9]$$

Expressando a equação anterior por unidade de área da superfície emissora, tem-se o fluxo de radiação espectral dq_{λ}'' , em $W/(m^2\mu m)$, igual a:

$$dq_{\lambda}'' = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cdot \cos \theta \cdot d\omega \quad [2.10]$$

Utilizando a relação já utilizada atrás:

$$d\omega = \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad [2.11]$$

Obtém-se a seguinte expressão que permite calcular dq_{λ}'' em função dos diferenciais dos ângulos Φ e θ :

$$dq_{\lambda}'' = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad [2.12]$$

Note-se que o valor da taxa de intensidade espectral $I_{\lambda,e}$ deverá ser conhecida, sendo tal abordado mais à frente.

Realizando a integração, considerando os limites já referidos para os ângulos em causa, pode-se obter, em $W/(m^2\mu m)$, o poder emissivo hemisférico espectral, ou seja o poder emissivo hemisférico para um determinado comprimento de onda λ .

$$E_{\lambda}(\lambda) = q_{\lambda}''(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad [2.13]$$

Realizando agora a integração para todo o espectro em termos de comprimentos de onda obtém-se o valor do poder emissivo total hemisférico, medido em W/m^2 :

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad [2.14]$$

Um caso especial é o designado por emissor difuso em que a radiação emitida é independente da direção do espaço, podendo pois apontar-se que o poder emissivo espectral, em $W/(m^2\mu m)$, pode ser calculado através de:

$$E_{\lambda}(\lambda) = q_{\lambda}''(\lambda) = \pi \cdot I_{\lambda,e}(\lambda) \quad [2.15]$$

Sendo que π vem expresso em estereorradianos (sr).

Além da análise anterior, relativamente à radiação emitida por uma superfície, pode-se usar a mesma metodologia para abordar a taxa de radiação incidente numa superfície e que se dá o nome de irradiação (Incropera e DeWitt, 2008). Também a irradiação tem um caráter direcional e espectral (Figura 2.11). Esta irradiação tem em geral origem na emissão e reflexão decorrente das superfícies que rodeiam a em estudo.

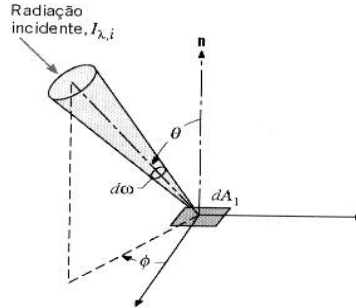


Figura 2.8
NATUREZA DIRECIONAL E ESPETRAL DA IRRADIAÇÃO
(Incropera e DeWitt, 2008)

A irradiação espectral, resultante da radiação incidente proveniente de todas as direções, mensurada em $W/(m^2\mu m)$, pode então ser calculada através da seguinte expressão:

$$G_{\lambda}(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad [2.16]$$

E a irradiação total, mensurada em W/m^2 , resultante da radiação incidente proveniente de todas as direções do espaço e respeitante a todos os comprimentos de onda, pode ser calculada através de:

$$G = \int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad [2.17]$$

Também um caso específico é o da possibilidade da radiação incidente ser difusa, sendo que neste caso a irradiação espectral pode se determinada através de:

$$G_{\lambda}(\lambda) = \pi \cdot I_{\lambda,i}(\lambda) \quad [2.18]$$

Com π expresso em estereorradianos (sr).

Por fim, é ainda possível usar esta metodologia para abordar toda a energia radiante proveniente de uma superfície, que é resultante da energia emitida e da energia refletida por ela própria (Figura 2.9).

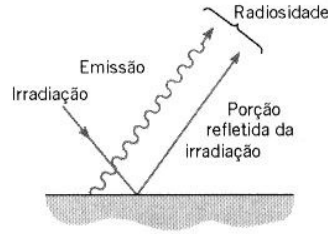


Figura 2.9
RADIOSIDADE DE UMA SUPERFÍCIE
(Incropera e DeWitt, 2008)

A radiosidade espectral, medida em $W/(m^2\mu m)$, pode então ser calculada através de:

$$J_{\lambda}(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e+r}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad [2.19]$$

E a radiosidade total em W/m^2 , resultante da radiação emitida e refletida em todas as direções do espaço e respeitante a todos os comprimentos de onda, pode ser calculada através de:

$$J = \int_0^{\infty} J_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad [2.20]$$

Para o caso específico da superfície comportar-se como emissor e refletor difuso, a radiosidade espectral pode ser calculada através de:

$$J_{\lambda}(\lambda) = \pi \cdot I_{\lambda,e+r}(\lambda) \quad [2.21]$$

Com π expresso em estereorradianos (sr).

Para que os cálculos anteriores do poder emissivo, da irradiação e da radiosidade possam ser efetuados é necessário saber o valor da intensidade espectral da radiação. Será esse assunto que se desenvolverá nos pontos seguintes.

2.8.3.2 Absortividade, refletividade, transmissibilidade e emissividade

A transferência de calor entre dois corpos opacos depende em especial das características das respetivas superfícies. Cada corpo emite radiação térmica proveniente de todos os pontos da superfície e em todas as direções do espaço hemisférico que se situa para cima do plano tangente em cada um dos pontos, sendo que só parte da radiação de um corpo chega ao outro e vice-versa.

A parcela da radiação recebida por um corpo face à proveniente de outro depende do tamanho e forma desses corpos, das características das suas superfícies (por exemplo se são polidas ou rugosas, se estão perfeitamente limpas e isentas de poeiras ou não), das suas posições relativas e das características do espaço existente entre eles. A radiação proveniente de um corpo é originada pela conjugação da energia emitida e refletida pelo próprio. A diferença entre o somatório da radiação emitida e refletida do corpo, e a radiação absorvida por este, é numericamente igual ao balanço de transferência de calor a que o corpo em estudo fica sujeito (Incropera e DeWitt, 2008). A quantidade de radiação emitida por determinado comprimento de onda é chamada de radiação monocromática.

Considerando que numa parcela de superfície de um corpo incide um valor G (W/m^2) de energia irradiada, verifica-se que esta em parte vai ser absorvida no valor αG , noutra parte vai ser refletida no valor ρG e finalmente numa parte restante poderá ser transmitida através do corpo, saindo no lado oposto, no valor de ζG . Deste modo, pode-se sintetizar esta distribuição da energia irradiada do seguinte modo:

$$G = \alpha G + \rho G + \zeta G \quad [2.22]$$

em que:

- α é o coeficiente de absorção ou absortividade total;
- ρ é o coeficiente de reflexão ou refletividade total;
- ζ é o coeficiente de transmissão ou transmissibilidade total.

Pode, ainda, indicar-se a relação entre estes três coeficientes, do seguinte modo:

$$\alpha + \rho + \zeta = 1 \quad [2.23]$$

Esta expressão é utilizada, por exemplo, para corpos semitransparentes como é o caso do vidro.

Se o corpo for opaco, os fenómenos passam-se somente a nível superficial, sendo a sua transmissibilidade nula, ou seja $\zeta = 0$, resultando, então, que:

$$\alpha + \rho = 1 \quad [2.24]$$

Ao contrário da convecção e da condução, a transferência de calor por radiação não necessita de meio material convencional pois a propagação é realizada por intermédio de ondas eletromagnéticas/partículas designadas por fótons. Deste modo é corrente referir-se que a transferência de calor por radiação pode-se efetivar no vácuo. Se uma superfície de um corpo sólido estiver à temperatura absoluta T_w e se esta estiver completamente rodeada por uma outra superfície sólida que está à temperatura absoluta T_{viz} , inferior à primeira, e se entre essas superfícies existir vácuo ou um fluido que se possa considerar não absorvente, o balanço do fluxo de calor por radiação $\frac{q}{A}$ (em W/m^2); da superfície à temperatura T_w para a superfície à temperatura T_{viz} é dada pela expressão seguinte conhecida pela Lei Stefan-Boltzmann (Físico Esloveno Josef Stefan (1835-1893) e Físico Austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906)):

$$\frac{q}{A} = \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_{viz}^4) \quad [2.25]$$

Em que:

- ε (adimensional) é a emissividade total da superfície sólida à temperatura absoluta T_w e que se pode definir pela razão entre a radiação emitida pela superfície e a radiação emitida por um corpo negro (ver 2.8.3.3) à mesma temperatura (Incropera e DeWitt, 2008);
- σ é uma constante designada por Stefan-Boltzmann e cujo valor será calculado em [2.35];
- A é área (em m^2) da superfície sólida à temperatura T_w .

De referir que a expressão anterior é somente válida para corpos em que as suas superfícies sejam cinzentas difusas (ver 2.8.3.4), pois caso contrário para calcular o balanço de fluxo de calor $\frac{q}{A}$ seria necessário utilizar a seguinte expressão:

$$\frac{q}{A} = \varepsilon \sigma T_w^4 - \alpha \sigma T_{viz}^4 \quad [2.26]$$

De referir, igualmente, que numa superfície cinzenta difusa tanto a absortividade como a emissividade são independentes do comprimento de onda bem como da direção da radiação (por isso se diz difusa) (Incropera e DeWitt, 2008).

Na prática, este balanço de fluxo de calor é resultado da diferença da energia radiante ou radiosidade do corpo, que é o resultado da adição da energia emitida e da fração refletida da irradiação, e a irradiação, que é o resultado da radiação incidente proveniente de todas as

direções do espaço circundante (Incropera e DeWitt, 2008). Assim, como todas as superfícies de corpos emitem e recebem radiação térmica, se uma delas tiver uma radiosidade superior à radiação que nele incide e é absorvida, a temperatura do corpo vai diminuir. Deste modo, para se saber da velocidade com que um corpo ganha ou perde energia é necessário saber qual o balanço global da troca de energia radiante entre este e o ambiente circundante.

Praticamente em todas as situações reais de edifícios, a transferência de calor por radiação se processa conjuntamente com a transferência de calor por convecção, podendo neste caso ter utilidade o cálculo de um coeficiente combinado de convecção e radiação. A grande dificuldade, já referida, que envolve o cálculo do coeficiente de convecção adicionada às particularidades da transferência de calor por radiação, torna a determinação desse coeficiente combinado, uma tarefa que envolve grande complexidade. Assim, conjugando a quantidade de calor q transferido por radiação com a de convecção, esta pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$q = h' A (T_w - T_{viz}) + \varepsilon \sigma A (T_w^4 - T_{viz}^4) \quad [2.27]$$

Sendo que esta equação se pode escrever do seguinte modo:

$$q = h_c A (T_w - T_{viz}), \text{ em que} \quad [2.28]$$

h_c é o coeficiente conjugado da convecção e radiação, podendo ser calculado através da seguinte equação:

$$h_c = h' + \varepsilon \sigma (T_w^2 + T_{viz}^2)(T_w + T_{viz}) \quad [2.29]$$

É importante referir que num corpo real, a radiação é emitida em todas as direções do espaço mas não de uma forma uniforme, ou seja a emissividade depende das direções do espaço.

2.8.3.3 Corpo Negro

Foi Gustav Kirchhof que pela primeira vez em 1860 propôs o termo Corpo Negro para caracterizar um corpo que tem a capacidade de absorver toda a radiação incidente e cuja distribuição espectral depende apenas da sua temperatura. Um corpo negro, também designado de radiador ideal, é uma aproximação à realidade, pois a sua emissividade é igual a um, emitindo pois a radiação máxima possível e de uma forma uniforme em todas as direções do espaço, podendo pois considerar-se um emissor difuso. Deste modo, e para uma determinada temperatura, nenhuma superfície possui um poder emissivo superior ao do corpo negro (Incropera e DeWitt, 2008).

Particularmente, os corpos negros têm a característica de tanto o coeficiente de reflexão total como o de transmissão total serem nulos ($\rho=0$ e $\zeta=0$), sendo pois a absortividade igual a um ($\alpha=1$). Deste modo, um corpo negro tem a característica de emitir toda a energia que é absorvida ($\alpha = \varepsilon = 1$). A aproximação a corpo negro é utilizada em situações como a representada na Figura 2.10 de forma a representar o funcionamento em termos de radiação do meio envolvente a uma superfície em estudo, que foi atrás considerada superfície representativa da vizinhança que envolve a superfície do corpo considerado. Assim, considerando uma grande cavidade isotérmica, que tem propriedades semelhantes ao corpo negro, em que uma pequena superfície se encontra no seu interior, conclui-se que a energia radiada pela vizinhança da superfície, ou seja irradiada para a pequena superfície, é igual à emissão de um corpo negro (E_{cn}) à temperatura T_{viz} (Incropera, e DeWitt, 2008):

$$G \text{ (W/m}^2\text{)} = E_{cn} \quad [2.30]$$

Na Figura seguinte apresenta-se, assim, uma cavidade cujo comportamento se pode aproximar a um corpo negro.

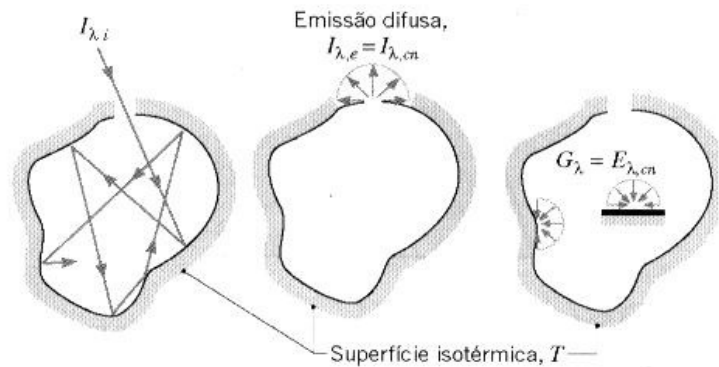


Figura 2.10
CORPO NEGRO MATERIALIZADO POR UMA CAVIDADE
(Incropera e DeWitt, 2008)

A intensidade espectral ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$) da emissão de um corpo negro foi determinada em 1890 por Planck através da seguinte expressão que ficou conhecida como a Lei de Planck e que faz depender a radiância, para determinada frequência, do corpo negro da sua temperatura absoluta (T) em graus Kelvin e do respetivo comprimento de onda (λ) em metros.

$$I_{\lambda,cn}(\lambda, T) = \frac{2hc_o^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc_o}{\lambda k T}\right) - 1 \right]} \quad [2.31]$$

Em que:

- k é a designada constante de Boltzmann e que toma o valor de $1,380658 \cdot 10^{-23}$ J/K;
- h é a designada constante de Planck e que toma o valor de $6,62600755 \cdot 10^{-34}$ J.s;
- c_0 é a velocidade da luz no vácuo e que toma o valor de $2,9979 \cdot 10^8$ m/s.

Sendo o corpo negro um emissor difuso, pode-se calcular o seu poder emissivo pela seguinte expressão ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$):

$$E_{\lambda, \text{cn}}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda, \text{cn}}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad [2.32]$$

Em que: $C_1 = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c_0^2 = 3,742 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$ e $C_2 = h \cdot c_0/k = 1,439 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ são as designadas constantes de radiação.

A equação anterior, designada por distribuição de Planck (Incropera e DeWitt, 2008), está representada graficamente na Figura 2.11 para algumas temperaturas absolutas e para a faixa do espectro correspondente à radiação térmica.

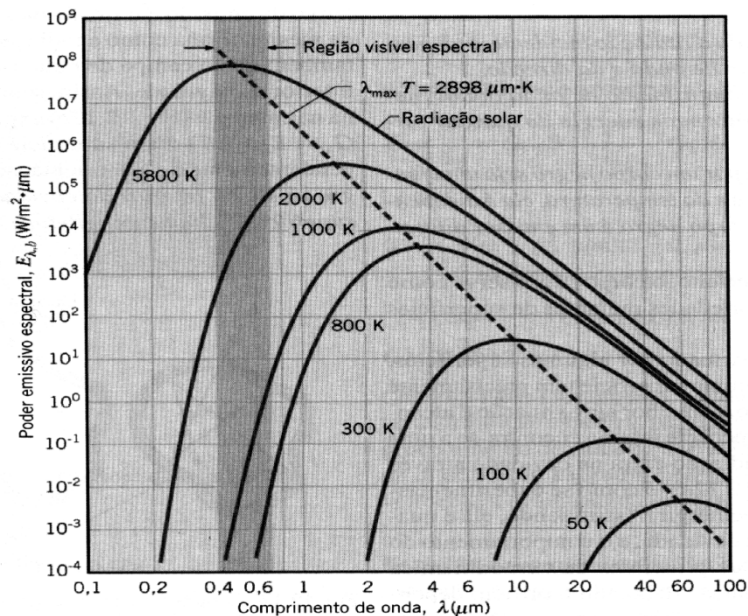


Figura 2.11
REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO DE PLANCK
(Incropera e DeWitt, 2008)

O poder emissivo total (W/m^2) de um corpo negro, para uma determinada temperatura T , em graus Kelvin, considerando a totalidade do espectro em termos de comprimentos de onda, pode ser calculado através de:

$$E_{cn} = \int_0^{\infty} E_{\lambda, cn}(\lambda, T) d\lambda \quad [2.33]$$

Realizando o cálculo do integral pode-se chegar ao seguinte resultado conhecido por Lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_{cn} = \pi \int_0^{\infty} I_{\lambda, cn}(\lambda, T) d\lambda = \frac{C_1 \pi^4}{15 C_2^4} T^4 = \sigma T^4 \quad [2.34]$$

Sendo σ uma constante designada por Stefan-Boltzmann e cujo valor é determinado por:

$$\sigma = \frac{C_1 \pi^4}{15 C_2^4} = 5,67051 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4) \quad [2.35]$$

Da Figura anterior, verifica-se que quanto maior for a temperatura absoluta maior é o poder emissivo do corpo e mais radiação é emitida na faixa de menores comprimentos de onda, ou seja de maior frequência. Deste modo e no respeitante à faixa da luz visível quanto maior a temperatura mais aproximação existe à cor violeta. Na figura anterior também está evidenciada a Lei de Deslocamento ou segunda Lei de Wien, cujo nome honra o seu descobridor, o físico Alemão Wilhelm Franz Wien (1864 – 1928), que permite saber, para uma dada temperatura (T) em graus Kelvin, qual o comprimento de onda ($\lambda_{máx}$) para o qual o poder emissivo do corpo é máximo. Tal $\lambda_{máx}$ (μm) pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$\lambda_{máx} T = C_3 \quad [2.36]$$

Em que a constante de radiação C_3 toma o valor de $2897,8 \approx 2898 \mu\text{m.K}$.

Millet (1984) além da segunda Lei de Wien refere-se ainda à primeira Lei do mesmo nome, que é uma proposta de simplificação à distribuição de Planck, bem como à terceira Lei que permite obter o valor máximo do poder emissivo em $\text{W/(m}^2\mu\text{m)}$ para determinada temperatura T do corpo, ou seja permite saber qual o poder emissivo correspondente ao $\lambda_{máx}$:

$$E_{\lambda_{máx}, cn}(\lambda, T) = B.T^5 \quad [2.37]$$

Em que B toma o valor de $1,287 \cdot 10^{-11} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot (\mu\text{m} \cdot \text{K}^5))$.

É relevante referir que o Sol pode-se aproximar a um corpo negro a emitir numa temperatura de cerca de 5800 graus Kelvin, sendo que o maior poder emissivo espectral dá-se exatamente para a faixa de radiação visível. Ao contrário, verifica-se que corpos negros que estejam a uma temperatura entre 300 e 800 graus Kelvin praticamente emitem toda a radiação na faixa dos infravermelhos. Usando a aproximação do Sol a um corpo negro pode-se calcular o poder emissivo por metro quadrado do Sol, para uma temperatura da fotosfera de 5800 graus Kelvin, pela seguinte expressão:

$$E_{cn} = \sigma T^4 = 5,67051 \cdot 10^{-8} \cdot 5800^4 = 6,41 \cdot 10^7 \text{ W} / \text{m}^2 = 64,1 \text{ MW} / \text{m}^2 \quad [2.38]$$

A quantidade de calor emitida pelo Sol a partir da globalidade da sua área superficial (A_{sol}) pode ser calculado através de:

$$\dot{Q} = E_{cn} A_{\text{sol}} = 6,41 \cdot 10^7 \cdot 4\pi \cdot r_{\text{sol}}^2 = 6,41 \cdot 10^7 \cdot 4\pi \cdot 696000000^2 = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ W} \quad [2.39]$$

Sendo r_{sol} o raio do Sol que se assume ter o valor de 696000 Km.

Quanto ao valor da radiação solar por metro quadrado que chega ao topo da atmosfera da Terra, a uma distância média do Sol de $149,6 \cdot 10^6$ Km, esta designa-se por constante solar e pode ser calculada através da expressão:

$$E_0 = \frac{E_{cn} \cdot A_{\text{sol}}}{4\pi d^2} = \frac{3,9 \cdot 10^{26}}{4\pi \cdot (149,6 \cdot 10^9)^2} = 1386,7 \text{ W/m}^2 \quad [2.40]$$

De referir que esta constante solar, que vulgarmente se assume igual a $1,4 \text{ KW/m}^2$ (Moita, 1987), na prática é variável pois depende da distância da Terra ao Sol assim como da própria atividade solar. Existem inclusivamente tabelas que apresentam fatores de correção da constante solar de acordo com a época do ano (Silva, 2006).

Na Figura 2.15 apresenta-se a distribuição espectral da radiação solar tanto ao nível da extremidade externa da atmosfera como ao nível do mar.

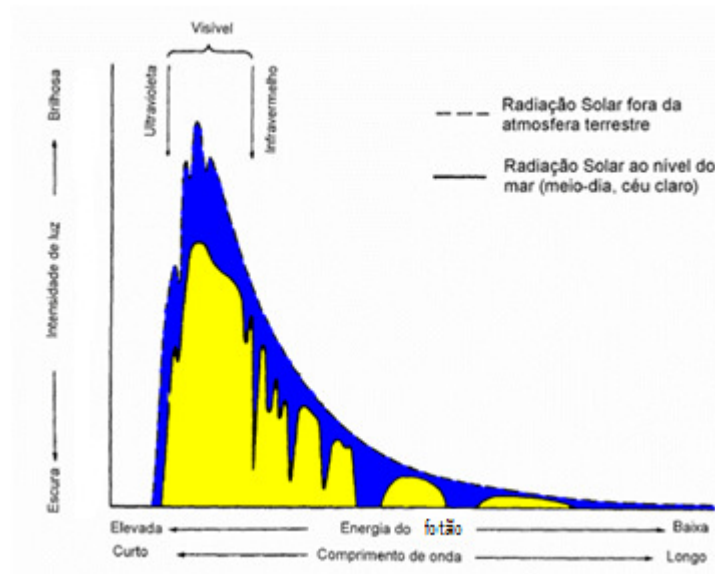


Figura 2.12

DISTRIBUIÇÃO ESPETRAL DA RADIAÇÃO SOLAR

(Adaptado do Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica. [Em linha]. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=301>>)

Para explicar a diferença entre as duas distribuições espectrais é importante referir que a radiação solar ao entrar na atmosfera sofre uma diminuição da sua intensidade bem como uma modificação da sua distribuição espectral e direcional devido não só ao espalhamento mas também à absorção originada pelas várias substâncias constituintes da atmosfera (Incropera e DeWitt, 2008).

2.8.3.4 Corpo Cinzento

Os corpos cujas superfícies só absorvem parte da radiação incidente (e não a totalidade como é o caso do corpo negro) mas emitem esse mesmo valor absorvido de igual forma para os vários comprimentos de onda, ou seja, superfícies em que a emissividade é igual à absorvidade (Saraiva, 2011), são designados por corpos cinzentos. Então, em corpos cinzentos opacos, como $\alpha = \varepsilon$ e como $\alpha + \rho = 1$, pode-se inferir que:

$$\varepsilon + \rho = 1 \text{ ou seja } \rho = 1 - \varepsilon \quad [2.41]$$

A relação entre o poder de emissão de um corpo cinzento e de um corpo negro é dada pela emissividade (ϵ) da superfície desse corpo, ou seja, se a emissividade do corpo cinzento for de 0,7, isto quer dizer que possui um poder de emissão para todos os comprimentos de onda de 70% em relação ao correspondente do corpo negro. Importa referir que uma superfície cinzenta difusa é uma superfície cujo comportamento é independente do comprimento de onda e da direção da radiação (Incropera e DeWitt, 2008).

2.8.3.5 Corpo real

As superfícies reais têm um comportamento diferente do corpo negro que, como se viu, é um radiador e emissor ideal. No entanto, para o estudo das superfícies reais é muito importante ter como referência o comportamento do corpo negro. Algo que deve ser evidenciado é que a radiação emitida por uma superfície real não segue a distribuição de Planck (Figura 2.13).

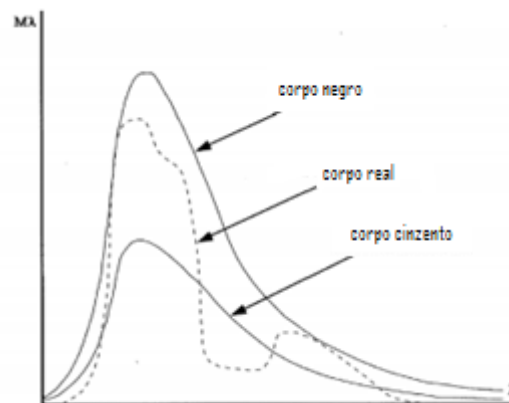


Figura 2.13
CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPETRAL DOS CORPOS NEGROS, CINZENTOS E REAIS
(Adaptado de Santos, 2006)

Pode-se, pois, dizer que um corpo real é em geral um radiador seletivo devido ao facto da sua emissividade variar com o comprimento de onda, existindo faixas de comprimentos de ondas em que a emissividade é maior do que outras. Esta situação não acontece nem com os corpos negros nem com os corpos cinzentos. Na Figura 2.14 apresenta-se a emissividade espectral representativa dos três tipos de corpos referidos, sendo que o valor da emissividade apresentada para o corpo cinzento é meramente exemplificativo.

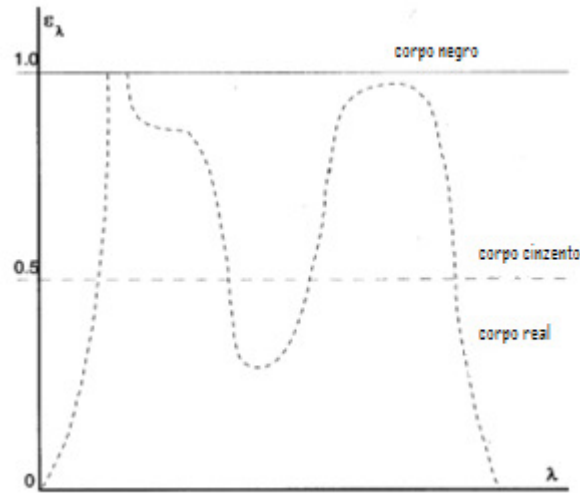


Figura 2.14
EMISSIVIDADE ESPETRAL DOS CORPOS NEGROS, CINZENTOS E REAIS
 (Adaptado de Santos, 2006)

As curvas de distribuição espectral apresentadas atrás correspondem a espectros contínuos, ou seja, não existem determinadas frequências ou faixas em que a emissão de radiação é inexistente. No entanto, muitas substâncias apresentam distribuições descontínuas do poder emissivo em função do comprimento de onda, produzindo espectros de emissão que podem ser de bandas ou de riscas de acordo com a existência ou não de uma gama de frequências de emissão relativamente larga.

É igualmente relevante referir que o corpo real, em termos de distribuição direcional espacial, não é normalmente perfeitamente difuso. Num corpo real opaco, a emissividade, a absortividade e a refletividade além de variarem com a direção do espaço, possuem dependência espectral, ou seja variam com o valor do comprimento de onda da radiação.

A emissividade direcional espectral de um corpo real para uma determinada temperatura T é a razão entre a intensidade de radiação emitida no comprimento de onda λ , e nas direções θ e Φ , e a intensidade de radiação emitida por um corpo negro para o mesmo comprimento de onda e temperatura:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi,T) \equiv \frac{I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi,T)}{I_{\lambda,cn}(\lambda,T)} \quad [2.42]$$

É possível ainda definir outros tipos de emissividades:

- Emissividade direcional total para determinada temperatura, associada ao conjunto de todos os comprimentos de onda:

$$\varepsilon_{\theta}(\theta, \phi, T) \equiv \frac{I_e(\theta, \phi, T)}{I_{cn}(T)} \quad [2.43]$$

- Emissividade hemisférica espectral para uma determinada temperatura, associada a todas as direções do espaço relacionadas à superfície em estudo:

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) \equiv \frac{E_e(\lambda, T)}{E_{cn}(\lambda, T)} \quad [2.44]$$

- Emissividade hemisférica total para uma determinada temperatura, associada a todos os comprimentos de onda e a todas as direções do espaço:

$$\varepsilon(T) \equiv \frac{E_e(T)}{E_{cn}(T)} \quad [2.45]$$

Na Figura 2.15 mostra-se para uma direção perpendicular às superfícies de vários materiais, a dependência, em relação ao valor do comprimento de onda, da absortividade e da refletividade na faixa espectral correspondente à radiação térmica.

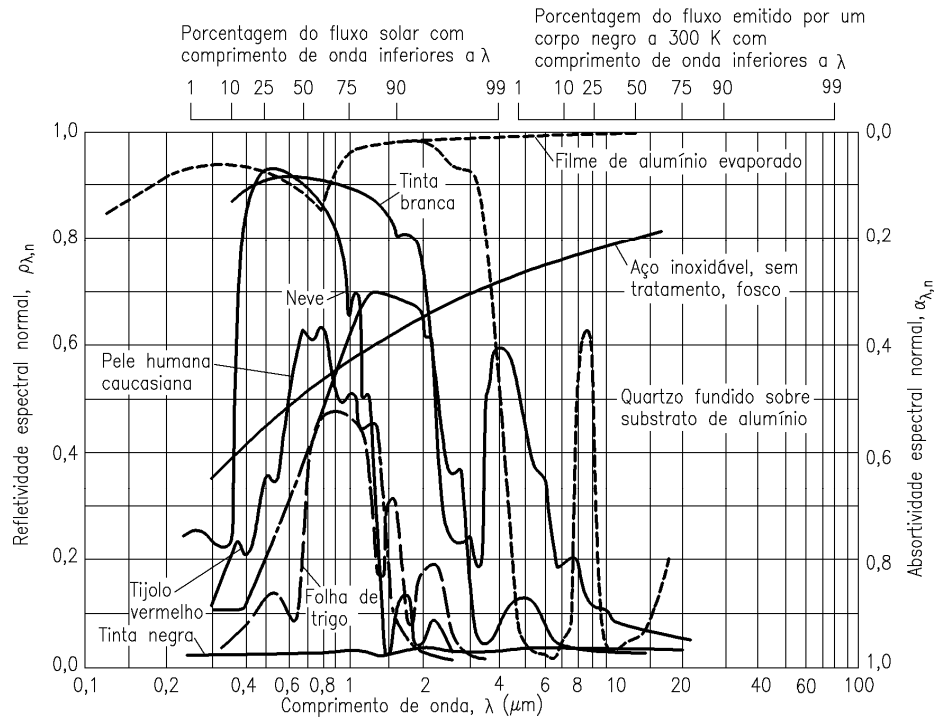


Figura 2.15
VARIAÇÃO DA ABSORTIVIDADE E DA REFLETIVIDADE NORMAIS COM O COMPRIMENTO DE ONDA
(Incropera e DeWitt, 2008)

Verifica-se, pois, que as películas de alumínio possuem uma elevada refletividade em todo o domínio do espectro em especial a partir dos 2 μm , já pois no domínio da radiação infravermelha. Por comparação, uma superfície pintada a branco tem um bom comportamento nas faixas da radiação visível e dos infravermelhos mais próximos dessa zona, mas a partir dos 2 μm possui um abaixamento elevado da refletividade. É pois perfeitamente compreensível a vantagem do uso de películas em alumínio como barreira à radiação térmica, por exemplo em edifícios.

2.8.3.6 Transferência de calor por radiação entre superfícies

A transferência de calor entre superfícies depende principalmente da geometria e orientação das mesmas, das suas propriedades radiantes e da temperatura a que estão submetidas. Geralmente a quantificação dessa transferência pressupõe que entre essas superfícies exista um meio não participante, ou seja que não interfere naquela, sendo que a maioria dos gases se pode aproximar a esta situação. Para o cálculo da troca de radiação entre superfícies usa-se o conceito de fator de forma que basicamente é a taxa da radiação que deixa uma superfície i e chega a uma j ($dq_{i \rightarrow j}$) e que pode ser determinada através da expressão:

$$dq_{i \rightarrow j} = I_{e+r,i} \cos \theta_i dA_i d\omega_{j-i} \quad [2.46]$$

Em que:

- $I_{e+r,i}$ é a intensidade de radiação que deixa a superfície i devido a energia emitida (e) e refletida (r);
- $\cos \theta_i$ é o cosseno do ângulo polar θ_i entre o segmento de reta que une as duas superfícies elementares e a normal n_i à superfície dA_i (ver Figura 2.16);
- $d\omega_{j-i}$ é o ângulo sólido associado a dA_j quando este é observado de dA_i (ver Figura 2.16).

Caso seja possível aceitar que a superfície elementar dA_i emite e reflete radiação de forma difusa, tem-se que:

$$dq_{i \rightarrow j} = J_i \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad [2.47]$$

Em que:

- J_i é a radiosidade de dA_i ;
- R é a distância entre as duas superfícies elementares dA_i e dA_j (ver Figura 2.16);
- $\cos \theta_j$ é o cosseno do ângulo polar θ_j entre o segmento de reta que une as duas superfícies elementares e a normal n_j à superfície dA_j (ver Figura 2.16).

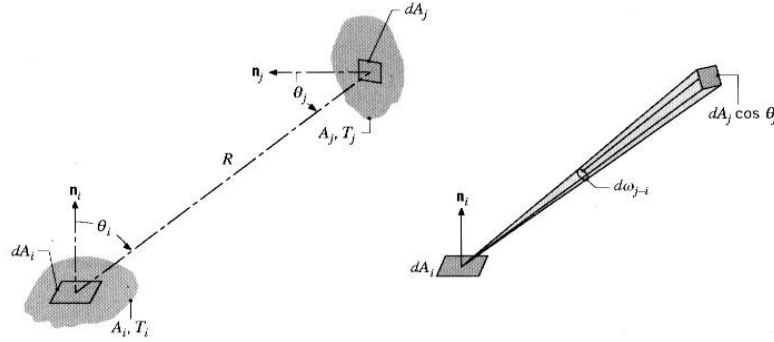


Figura 2.16
DETERMINAÇÃO DO FATOR DE FORMA ASSOCIADO À TROCA DE RADIAÇÃO ENTRE SUPERFÍCIES
(Incropera e DeWitt, 2008)

De forma a calcular a taxa total de radiação que deixa a superfície i e é interceptada por j utiliza-se a seguinte expressão:

$$q_{i \rightarrow j} = J_i \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad [2.48]$$

Definindo-se o fator de forma (F_{ij}) como a fração da radiação que deixa a superfície i e que é interceptada por j :

$$F_{ij} = \frac{q_{i \rightarrow j}}{A_i J_i} \quad [2.49]$$

Pode-se escrever o fator de forma a partir da seguinte expressão:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad [2.50]$$

Seguindo a mesma metodologia pode-se determinar o fator de forma (F_{ji}) como a fração da radiação que deixa a superfície j e que é interceptada por i :

$$F_{ji} = \frac{1}{A_j} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad [2.51]$$

O fator de forma encerra algumas características fundamentais que a seguir se indicam:

- Relação de reciprocidade: $A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$ [2.52]

- Regra do somatório para uma cavidade fechada (Figura 2.17): $\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1$ [2.53]

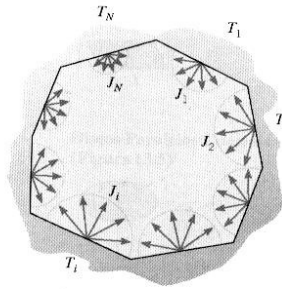


Figura 2.17
CAVIDADE FECHADA
(Incropera e DeWitt, 2008)

De referir que nesta regra do somatório $F_{ii} = 0$ se a superfície é plana ou convexa, sendo diferente de zero se for côncava.

2.8.3.7 Transferência de calor por radiação entre duas superfícies paralelas e infinitas

Se duas superfícies paralelas e infinitas pertencentes a dois corpos opacos 1 e 2 estiverem sujeitas a diferentes temperaturas, T_1 e T_2 , toda a radiação que deixa uma superfície atinge a outra (Figura 2.18), sendo, assim, o fator de forma igual a um.

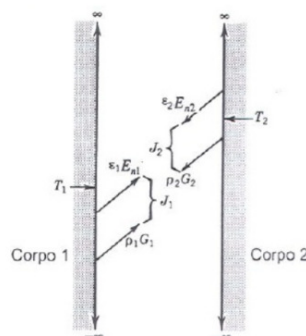


Figura 2.18
TROCA DE RADIAÇÃO ENTRE DUAS SUPERFÍCIES PARALELAS E INFINITAS
(Júnior. [Em linha]. Disponível em < <http://www.scribd.com/doc/13555202/Radiacao-Termica-Aspectos-Classicos-e-Quanticos> >)

A energia total (E_1) que deixa a superfície do corpo 1 é igual ao produto da sua radiosidade (J_1) pela sua área (A_1):

$$E_1 = J_1 A_1 = (\varepsilon_1 E_{n1} + \rho_1 G_1) A_1 \quad [2.54]$$

A energia total (E_2) que deixa a superfície de área A_2 do corpo 2 é da mesma forma igual a:

$$E_2 = J_2 A_2 = (\varepsilon_2 E_{n2} + \rho_2 G_2) A_2 \quad [2.55]$$

Pode-se então inferir que o balanço de calor transferido por radiação entre as duas superfícies de áreas $A_1 = A_2 = A$ é igual a:

$$\dot{Q} = J_1 A_1 - J_2 A_2 = A (J_1 - J_2) \quad [2.56]$$

Caso as superfícies possam ser consideradas corpos negros, pode-se inferir que $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$ e $\rho_1 = \rho_2 = 0$, sendo então possível simplificar a expressão [2.56] para:

$$\dot{Q} = E_{n1} A - E_{n2} A = A (\sigma T_1^4 - \sigma T_2^4) \quad [2.57]$$

A taxa de calor transferida por unidade de área é então igual a:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad [2.58]$$

Caso, agora, uma superfície se comporte como um corpo cinzento, tem de se ter em consideração, tal e qual para os corpos reais, a reflexão exercida pela mesma, só que essa reflexão é nas superfícies cinzas igual a $1 - \varepsilon$ (pois $\alpha = \varepsilon$ e $\rho = 1 - \alpha$), sendo então possível simplificar a expressão [2.56] para:

$$J = \varepsilon E_n + \rho G = \varepsilon E_n + (1 - \varepsilon) G \quad [2.59]$$

É relevante referir que embora a hipótese de superfície cinza seja razoável para muitas aplicações práticas, deverá existir algum cuidado no uso desta simplificação, sobretudo quando as regiões espectrais da irradiação e da emissão estiverem significativamente afastadas.

Da expressão [2.59] pode-se escrever a seguinte expressão para a determinação da irradiação:

$$G = \frac{J - \varepsilon E_n}{1 - \varepsilon} \quad [2.60]$$

O balanço de calor transferido de uma superfície opaca cinzenta pode ser calculada pela diferença entre a sua radiosidade (J) e a sua irradiação (G):

$$\dot{Q} = JA - GA = JA - \frac{J - \varepsilon E_n}{1 - \varepsilon} A = \frac{E_n - J}{(1 - \varepsilon)/\varepsilon A} \quad [2.61]$$

Se \dot{Q} for positivo significa que o balanço de calor resulta na transferência da superfície em questão e se for negativo é transferido para esta. Caso ambas as superfícies sejam infinitas, paralelas e cinzentas o balanço de calor perdido pelo corpo 1 é igual à que foi ganho pelo corpo 2.

$$\dot{Q} = \frac{E_{n1} - J_1}{(1 - \varepsilon_1)/\varepsilon_1 A} = - \frac{E_{n2} - J_2}{(1 - \varepsilon_2)/\varepsilon_2 A} \quad [2.62]$$

$$\dot{Q} = \frac{\sigma T_1^4 - J_1}{(1 - \varepsilon_1)/\varepsilon_1 A} = - \frac{\sigma T_2^4 - J_2}{(1 - \varepsilon_2)/\varepsilon_2 A} \quad [2.63]$$

Tendo em conta a interação entre as duas superfícies tem-se que:

$$\dot{Q} = J_1 A_1 - J_2 A_2 = A(J_1 - J_2) = \frac{J_1 - J_2}{(1/A)} \quad [2.64]$$

Uma abordagem muito útil é a realização da analogia entre a transferência de calor e a corrente elétrica, onde se aplica a Lei de Ohm para circuitos elétricos dispostos em série (Cavaliero, 2009):

$$I = \frac{V}{R} \quad [2.65]$$

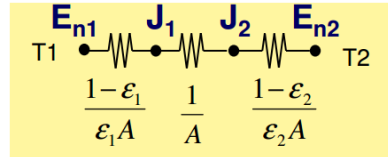
Em que:

- I: Intensidade da corrente elétrica (A – amperes);
- V: Diferença de potencial (V – volts);
- R: Resistência elétrica (Ω - ohms).

Em circuitos dispostos em série, a intensidade da corrente I é a mesma para todos os elementos constituintes, sendo pois a intensidade da corrente que percorre a totalidade das resistências elétricas a mesma (Martins, 2004). Assim, por analogia, o balanço de calor transferido \dot{Q} toma-se pela intensidade da corrente I . Quanto às resistências elétricas elas, por analogia, consideram-se iguais a:

$$R_1 = \frac{(1 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1 A}, R_2 = \frac{(1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_2 A}, R_{12} = \frac{1}{A} \quad [2.66]$$

Num circuito disposto em série a resistência elétrica total é igual ao somatório das resistências elétricas parcelares (Martins, 2004). Sendo que se pode esquematizar as mesmas através do circuito representado na Figura 2.19:

**Figura 2.19**

CIRCUITO DE RADIAÇÃO PARA DUAS SUPERFÍCIES CINZENTAS PARALELAS E INFINITAS
(Cavaliero, 2009)

Tomando $E_{n1} - E_{n2}$ como sendo a diferença de potencial do virtual circuito elétrico, a Lei de Ohm pode escrever-se da seguinte maneira:

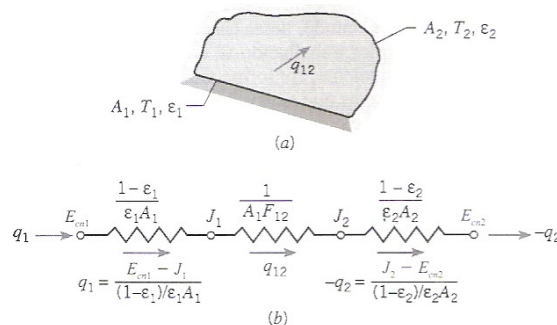
$$\dot{Q} = \frac{E_{n1} - E_{n2}}{R_{\text{total}}} \quad [2.67]$$

Que substituindo pelas relações já referidas anteriormente, pode escreve-se o balanço de calor transferido:

$$\dot{Q} = \frac{\sigma T_1^4 - \sigma T_2^4}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A} + \frac{1}{A} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A}} \quad [2.68]$$

2.8.3.8 Transferência de calor por radiação entre outros tipos de superfícies

Nos casos em que as superfícies são infinitas mas não paralelas ou não são infinitas, será necessário usar o conceito de fator de forma, pois nem toda a radiação que deixa uma superfície atinge a outra. Assim, e para o caso de uma cavidade constituída por duas superfícies em que estas só trocam radiação entre si, é necessário utilizar o conceito de fator de forma, apresentando-se na Figura 2.20 o diagrama esquemático bem como o circuito elétrico equivalente:

**Figura 2.20**

CAVIDADE CONSTITUÍDA POR DUAS SUPERFÍCIES. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO (a) CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE (b)
(Incropera e DeWitt, 2008)

Neste caso o balanço de calor transferido da superfície 1 para a superfície 2 é dado por:

$$\dot{Q} = q_{12} = \frac{\sigma T_1^4 - \sigma T_2^4}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad [2.69]$$

Sendo F_{12} o fator de forma entre a superfície 1 e 2.

Existindo várias superfícies a constituírem uma cavidade, o problema torna-se mais complexo e é muitas vezes recomendável usar-se o cálculo matricial. Para calcular os fatores de forma podem-se usar fórmulas ou ábacos. Existem fórmulas que, tal e qual a que se exemplifica na Figura 2.21, foram deduzidas para situações em que é admissível a abordagem através de geometria bidimensional.

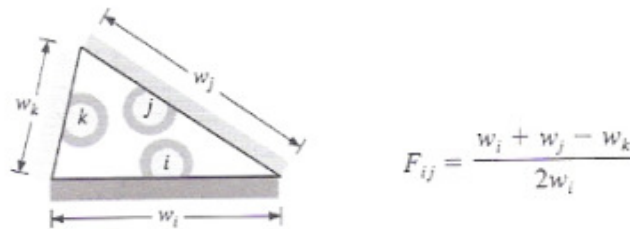


Figura 2.21
EXEMPLO DE FATOR DE FORMA PARA GEOMETRIA BIDIMENSIONAL
(Incropera e DeWitt, 2008)

Para geometria tridimensional, igualmente se podem usar fórmulas deduzidas para esse efeito (Figura 2.22).

**Retângulos Perpendiculares
com uma Aresta Comum**

$$H = Z/X, \quad W = Y/X$$

$$F_{ij} = \frac{1}{\pi W} \left(W \operatorname{tg}^{-1} \frac{1}{W} + H \operatorname{tg}^{-1} \frac{1}{H} - (H^2 + W^2)^{1/2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{1}{(H^2 + W^2)^{1/2}} + \frac{1}{4} \ln \left[\frac{(1 + W^2)(1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \left[\frac{W^2(1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(W^2 + H^2)} \right]^{W^2} \times \left[\frac{H^2(1 + H^2 + W^2)}{(1 + H^2)(H^2 + W^2)} \right]^{H^2} \right] \right)$$

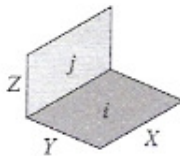
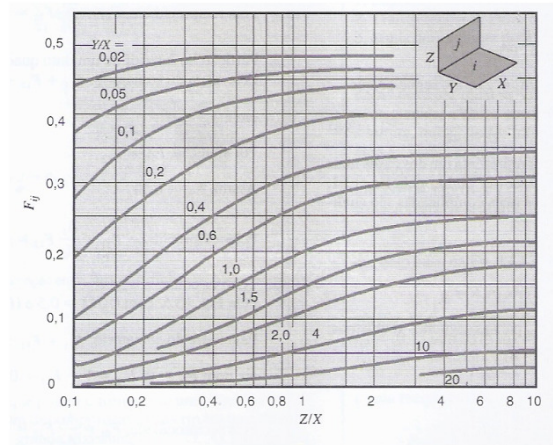


Figura 2.22
EXEMPLIFICAÇÃO DE FATOR DE FORMA PARA GEOMETRIA TRIDIMENSIONAL
(Incropera e DeWitt, 2008)

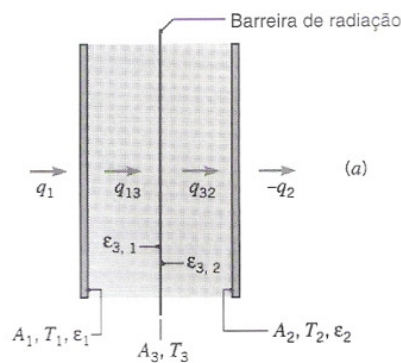
No respeitante aos ábacos, apresenta-se de seguida (Figura 2.23) um exemplo de determinação do fator de forma para geometria tridimensional.

**Figura 2.23**

FATOR DE FORMA PARA RETÂNGULOS PERPENDICULARES COM ARESTA COMUM
(Incropera e DeWitt, 2008)

2.8.3.9 Aplicação aos isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade

Tendo a transferência de calor por radiação uma grande importância em inúmeras situações relativas aos edifícios, para se reduzir o balanço de calor transferido \dot{Q} entre duas superfícies, recomenda-se aplicar entre as mesmas um isolante térmico refletante de baixa emissividade (ITRBE) (Figura 2.24) que funciona como barreira à radiação.

**Figura 2.24**

TROCA DE CALOR POR RADIAÇÃO ENTRE SUPERFÍCIES PARALELAS INFINITAS COM
INTERPOSIÇÃO DE BARREIRA À RADIAÇÃO
(Incropera e DeWitt, 2008)

Na Figura 2.24, o isolamento térmico refletante de baixa emissividade é o elemento 3 e as emissividades das suas duas superfícies podem ser diferentes ($\epsilon_{3,1}$ e $\epsilon_{3,2}$). Aplicando novamente a analogia elétrica, representa-se na Figura 2.25 o correspondente circuito elétrico equivalente.

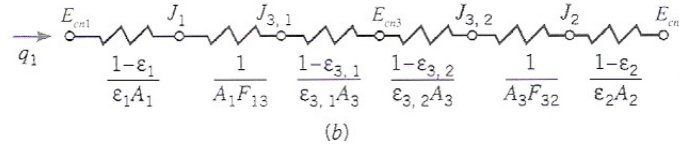


Figura 2.25
CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE
(Incropera e DeWitt, 2008)

Como as superfícies são paralelas e infinitas, os fatores de forma são unitários, ou seja toda a energia que sai de um superfície chega à outra, sendo que o balanço de radiação que é transferida da superfície $q_{12} = q_{13} = q_{23}$ pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$\dot{Q} = q_{12} = \frac{\sigma T_1^4 - \sigma T_2^4}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A} + \frac{1}{A} + \frac{1-\epsilon_{3,1}}{\epsilon_{3,1} A} + \frac{1-\epsilon_{3,2}}{\epsilon_{3,2} A} + \frac{1}{A} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A}} \quad [2.70]$$

CAPÍTULO III

SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO

3.1 CONCEITO DE ISOLAMENTO TÉRMICO

Al-Homoud (2004) refere que os benefícios conferidos pelo uso de isolamentos térmicos em edifícios são o da conservação de recursos naturais (permitindo uma duração superior dos recursos finitos, defendendo assim as próximas gerações) o da geração de benefícios económicos e ambientais, o da satisfação do cliente e o de constituir um benefício para cada País, melhorando o serviço de fornecimento de energia, ao mesmo tempo evitando a necessidade de construção de sistemas de produção de energia com mais potência.

Especificamente, o procedimento de isolar termicamente um edifício proporciona várias vantagens como é o caso da diminuição da potência dos sistemas ativos de climatização bem como a redução do respetivo custo com o consumo de energia, evidenciando-se a possibilidade de prescindir desses sistemas de climatização nas estações intermédias da Primavera e do Outono. Devido ao, em geral, maior coeficiente de forma das moradias em relação às frações dos edifícios multifamiliares, impõe-se com mais relevância nas primeiras o uso de eficientes técnicas de isolamento térmico. Para que o isolamento térmico de um edifício seja o mais eficiente possível poderá, por exemplo, ser recomendável usar sistemas que além de possuírem elevada resistência térmica à condução possuam um bom desempenho em termos de minimização das transferências de calor por radiação (Al-Homoud, 2004).

Além das características intrínsecas dos materiais de isolamento térmico, também a adequada respetiva aplicação, são essenciais para os resultados do seu desempenho.

Normalmente a ação dos materiais de isolamento térmico decorre nas várias formas de transmissão de calor, sendo que a sua espessura, a sua densidade, a emissividade das suas superfícies, entre outros, têm um papel fundamental no resultado final. É relevante referir que a definição da ASHRAE de isolamento térmico integra o conceito de diminuição da taxa de fluxo de calor pelas formas de condução, convecção e radiação (ASHRAE *cit. in* Al-Homoud, 2004).

Vittorino, Sato e Akutsu (2003) apresentam algumas considerações sobre a definição de material isolante térmico. Referem que tradicionalmente o isolamento térmico de coberturas estava confinado ao uso de materiais resistivos que, principalmente devido à grande quantidade de ar presente entre fibras ou confinado em pequenas células, diminuem a transferência de calor por condução.

Já posteriormente, englobou-se nas soluções relativas à diminuição do fluxo de calor em coberturas, a aplicação de materiais que atuam sobretudo nas trocas de calor por radiação, como é o caso dos isolamentos com revestimento refletante de baixa emissividade, sendo que por exemplo nos EUA desenvolveram-se várias normas técnicas, como é o caso da ASTM C 1483-00, que especifica regras para o uso, em paredes e coberturas de edifícios, de revestimentos exteriores para o controlo da radiação solar, que são basicamente pinturas que apresentam uma elevada refletividade e uma baixa emissividade em relação à radiação solar, ou da ASTM C 727 – 01 que define regras para a instalação e uso em edifícios de isolamentos refletantes de baixa emissividade, como é o caso das películas metálicas, confrontando espaços de ar fechados. Os EUA possuem inclusivamente um programa conjunto da Agência de Proteção Ambiental (EPA) e do Departamento de Energia, cujo objetivo é implementar medidas no sentido de proteger o ambiente e de poupar energia através do uso de técnicas e produtos energeticamente eficientes. Além de desenvolver procedimentos que visam a certificação destes produtos, o programa implementa mesmo o uso de isolamentos com revestimento refletante de baixa emissividade (ITRBEs), designados nos EUA por “*radiant barriers*”, para várias situações especificadas (ENERGY STAR. [Em linha]. Disponível em <http://www.energystar.gov/ia/partners/bldrs_lenders_raters/downloads/NationalProgram_Requirements_v3.pdf>).

Pelo que foi referido, pode-se então agrupar os materiais de isolamento térmico abordados anteriormente em dois grupos principais: Os resistivos, que têm uma ação relevante no que concerne à diminuição da transferência de calor por condução e os refletantes de baixa emissividade que não têm uma ação relevante no que concerne à condução, ao contrário da transferência de calor por radiação, em que a sua ação de minoração é muito importante. Será, assim, interessante comparar o funcionamento dos isolamentos térmicos resistivos com os isolamentos refletantes de baixa emissividade. Em relação aos tipos de isolamentos térmicos resistivos, existem várias metodologias para os classificar, sendo que uma delas é a apresentada por Al-Homoud (2004), que considera as seguintes categorias:

- Materiais inorgânicos que podem ser fibrosos (como a lã de rocha) ou celulares (como a cerâmica celular);
- Materiais orgânicos que podem ser igualmente fibrosos (como a fibra de celulose) ou celulares (como a cortiça ou as espumas de poliestireno).

Quanto aos isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade Al-Homoud (2004) refere que estes podem ser membranas refletoras metálicas ou metalizadas, que podem ser películas de alumínio e que para funcionarem devem confrontar um espaço preenchido por ar, por gás ou por vácuo e devem ser instalados de modo a evitar ao máximo as interferências negativas provocadas pela acumulação da poeira.

3.2 COMPORTAMENTO DOS ISOLAMENTOS TÉRMICOS RESISTIVOS

3.2.1 PRINCÍPIOS GERAIS

Sob o ponto de vista microscópico, e recorrendo aos conhecimentos da ciência dos materiais, pode-se afirmar que a reação da generalidade dos materiais à ação do calor é principalmente traduzida pela energia vibracional dos átomos da rede ao redor das suas posições de equilíbrio bem como pela energia cinética dos elétrons livres desses

mesmos átomos (Incropera e DeWitt, 2008). Esta reação ao calor é em geral quantificada por grandezas como a dilatação ou a expansão térmica, o calor específico e a condutibilidade térmica. A transferência de calor provoca o aumento da temperatura do corpo e da sua energia interna, existindo, pois, o interesse em se saber quanto tempo demora essa transferência a se efetivar, obtendo-se assim um conhecimento suplementar em relação à informação fornecida pela termodinâmica, que basicamente permite calcular a quantidade de calor transferida quando um sistema transita entre estados de equilíbrio.

O alumínio e o cobre são exemplos de metais que apresentam o máximo de condutibilidade térmica para temperaturas substancialmente baixas, nomeadamente inferiores a 100 graus Kelvin. Para temperaturas a partir da anterior, existe, apesar de algumas oscilações, a tendência para a diminuição da condutibilidade térmica com a temperatura (Figura 3.1).

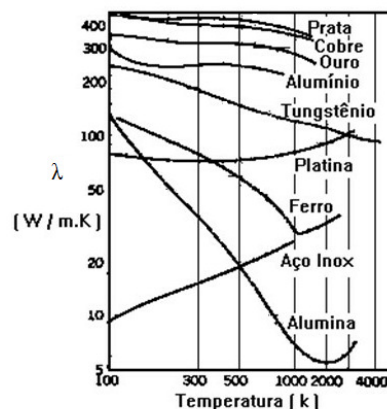


Figura 3.1

DEPENDÊNCIA DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DE ALGUNS MATERIAIS SÓLIDOS COM A TEMPERATURA

(Universidade Federal do Paraná. [Em linha]. Disponível em <

http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/engenheiro_do_petroleo/traf_calor.pdf>)

O alumínio puro apresenta uma condutibilidade térmica aos 100 graus Kelvin de 302 W/(mK), aos 200 e aos 300 graus Kelvin de 237 W/(mK), aos 400 graus Kelvin de 240 W/(mK) e aos 800 graus Kelvin de 218 W/(mK) (Incropera e DeWitt, 2008). Deste modo, verifica-se que depois de uma descida da condutibilidade térmica do alumínio entre os 100 aos 200 graus Kelvin, existe depois uma estabilização entre os 200 e os 300 graus Kelvin, a que se segue um ligeiro aumento até aos 400 graus Kelvin, seguindo-se uma nova diminuição.

Al-Homoud (2004) refere que no respeitante aos materiais de isolamento térmico, em geral, estes quando submetidos a temperaturas muito elevadas acabam por ter maior condutibilidade térmica.

É relevante referir que a condutibilidade térmica dos materiais de isolamento é fornecida em publicações, como é o caso das do LNEC (Santos e Matias, 2006), bem como é fornecida por variadíssimos fabricantes. No caso da referida publicação do LNEC, salienta-se que os valores apresentados das resistências térmicas de espaços de ar não ventilados pressupõem que estes são delimitados por duas superfícies paralelas entre si, perpendiculares à direção do fluxo de calor e com emissividades próximas das dos materiais correntes de construção, ou seja próximo de 0,9. A mesma publicação refere que para emissividades diferentes deste valor, nomeadamente para emissividades substancialmente mais baixas relacionadas com o uso de superfícies refletantes, o valor da resistência térmica das respetivas caixas de ar deve ser calculada com recurso ao protagonizado na norma Europeia EN ISO 6946 (CEN, 2007). Santos e Matias (2006) referem que os valores da condutibilidade térmica declarados pelos fabricantes no âmbito da marcação CE são relativos a uma temperatura média de ensaio de 10°C e a um teor de água de equilíbrio em ambiente de 23°C de temperatura e 50 % de humidade relativa.

3.2.2 A POROSIDADE NOS ISOLAMENTOS RESISTIVOS

Os materiais de isolamento resistivo, como é o caso das espumas poliméricas (por exemplo a espuma de poliuretano, a espuma de polietileno ou o poliestireno extrudido), possuem resistência térmica devido, não propriamente, ao material de que são constituídos, mas sim decorrente das células microscópicas fechadas, que além de evitarem a transferência por convecção, pois impedem que o ar se mova, permitem desenvolver no material espaços, cujo volume é em geral muito significativo, que apresentam valores dos coeficientes de condutibilidade térmica bem mais reduzidos. Os gases que ficam retidos nas células fechadas das espumas rígidas é que são os grandes responsáveis pela minimização da condutibilidade térmica do material tornando o

conjunto num excelente isolamento térmico. Estas espumas podem ser fabricadas com densidades muito variáveis e apresentarem célula aberta ou célula fechada, sendo que nas primeiras as células, que podem ou não estar interligadas, apresentam potencialidade para absorver líquidos, vapor e gases bem como apresentam menor capacidade de isolamento térmico e elétrico (Almeida, 2006). A menor capacidade de isolamento térmico das espumas de célula aberta deriva do facto que qualquer fluido como o ar, tem facilidade em circular através da malha polimérica, provocando uma relevante transmissão por convecção. Já nas espumas de célula fechada, que tendencialmente apresentam uma maior rigidez, a fase gasosa ao estar completamente envolvida pela fase sólida impede a comunicação entre células, resultando daí propriedades de bom isolamento térmico, pois além da condução de calor ser pequena a transmissão por convecção é desta vez nula.

A produção destas espumas compreende as fases de geração de gás, crescimento e estabilização. (Universidade do Minho – Grupo de Investigação de Plásticos Celulares. [Em linha]. Disponível em <<http://embalagenscelulares.no.sapo.pt/>>). A fase de geração das bolhas de gás é conseguida através da intervenção de um agente nucleante como por exemplo o talco, o bicarbonato de sódio, a poliamida, entre outros (Unicamp-Laboratório de Polímeros Condutores e Reciclagem. [Em linha]. Disponível em <<http://lpcr.iqm.unicamp.br/arquivos/hespumantesnucleantes.pdf>>).

O processo de expansão pode ser realizado com agentes químicos que ao decompor-se libertam gases, ou por agentes físicos que se adicionam diretamente à matriz polimérica na fase de moldagem. Por exemplo, a espuma de polietileno, que é uma das espumas poliolefinas mais usadas, e que compõe o interior de certos isolamentos térmicos com revestimento refletante de baixa emissividade, como o usado no presente estudo, podem usar como agentes expansivos físicos o dióxido de carbono, o nitrogénio, os hidrocarbonetos alifáticos, como o butano. Em relação aos agentes expansivos químicos usam-se os azos compostos, como a azodicarbonamida, os derivados de hidrozina, benzoaxinas e tetrazolas (Almeida, 2006).

Na formação da espuma de polietileno, como de outros materiais do mesmo tipo, pode realizar-se a operação de reticulação, adicionando um agente reticulante para obter

células uniformes fechadas de pequena dimensão, situação que implica a obtenção de materiais com maior densidade (Almeida, 2006) obtendo-se a espuma de polietileno reticulado. Refira-se que o ITRBE que foi usado nos ensaios experimentais deste trabalho, integra, no seu interior, espuma de polietileno extrudido não reticulado.

É importante alertar que se os materiais de isolamento, como as espumas poliméricas, tiverem as suas células não preenchidas por ar, mas por outro gás, ou mesmo por vácuo, a condutibilidade térmica final do material ainda pode atingir valores mais reduzidos (Al-Homoud, 2005).

Para a produção das espumas a partir de polímeros sólidos existe uma primeira fase em que o material e o agente expensor são aquecidos, iniciando-se a respetiva fusão, sendo que à medida que a temperatura sobe o agente expensor começa a decompor-se, sendo que a partir de determinado momento a quantidade de gás gerada já não consegue ser toda dissolvida pelo base polimérica originando-se assim a nucleação e a formação das células, que por sua vez vão crescendo até que exista equilíbrio entre a pressão do gás existente na célula e a tensão superficial das suas paredes. Depois do processo de expansão realizado, o material é finalmente sujeito a um arrefecimento (Almeida, 2006).

3.3 COMPORTAMENTO DOS ISOLAMENTOS TÉRMICOS REFLETANTES DE BAIXA EMISSIVIDADE

3.3.1 CARATERÍSTICAS E CUIDADOS NA APLICAÇÃO

Os elementos construtivos que têm de ser mais eficazmente isolados em relação à transmissão de calor por radiação são as coberturas, que em estação de verão poderão causar complicados efeitos de sobreaquecimento, sendo pois nestes casos em que por excelência se devem usar isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade, normalmente constituídos por películas de alumínio polido (Matias, 2001).

Os filmes de alumínio polido ou de polímero aluminizado, presentes numa ou em ambas as superfícies do material são em muitas das situações termocolados a um substrato, como é o caso da espuma de polietileno (PEF) ou do caso do plástico bolha, que reforçam mecanicamente o material. Noutras situações, os filmes não são aplicados a substratos mas unicamente sujeitos a um reforço (Daré, Targa e Isa, 2005). Apresenta-se na Figura 3.2 um esquema de montagem de uma cobertura com material isolante térmico refletante de baixa emissividade em telhado de telha cerâmica com estrutura de madeira.

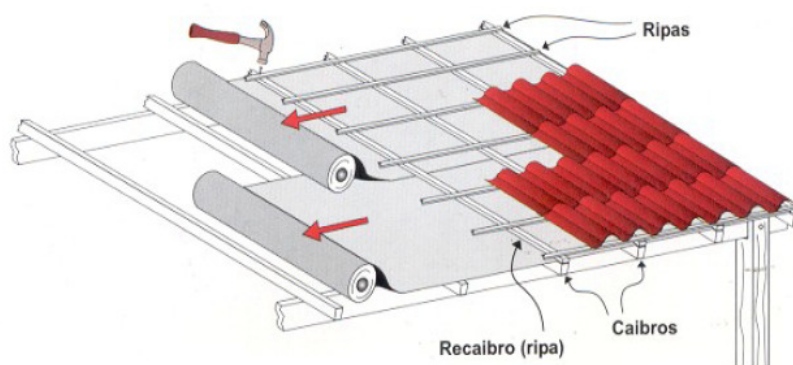


Figura 3.2
ESQUEMA DE MONTAGEM DA COBERTURA EM TELHADO CERÂMICO
(Pentak, cit. In Daré, Targa e Isa, 2003)

Algo que é extremamente importante cumprir na instalação destas barreiras é a adoção de uma caixa de ar de pelo menos 2,5 cm entre a película refletante, normalmente uma película de alumínio polido, e o elemento construtivo adjacente (Matias, 2001).

É relevante indicar que a norma ASTM C1313 (2012), dos EUA, que especifica as propriedades físicas que devem respeitar os isolamentos térmico refletantes de baixa emissividade aplicados a edifícios, exige que estes materiais, para serem classificados como tal, devem possuir uma refletância superior a 0,9 e devem possuir uma emissividade abaixo de 0,1.

Outro esquema de montagem que se pode utilizar para os isolamentos refletantes de baixa emissividade (ITRBEs), e que foi utilizado no âmbito do presente trabalho, é a aplicação dos mesmos sobre a laje de esteira, no entanto esta aplicação pode ter

problemas mais evidentes de diminuição da emissividade das películas de alumínio com a acumulação de poeiras e detritos, bem como sendo um material condutor quando está, em especial, em contacto com cabos de eletricidade, é conveniente efetuar uma ligação à terra. Também importa referir que caso um edifício seja isolado em toda a sua envolvente com ITRBEs que integram revestimentos de alumínio polido, poderão existir interferências e até impedimentos no que respeita à propagação das micro-ondas associadas às comunicações móveis, que se em certos compartimentos como escritórios poderá ser uma desvantagem pois prejudica a comunicação para o exterior, no caso de habitações poderá ser uma vantagem para a saúde humana em se diminuir a exposição a estas radiações. De referir que o autor realizou a experiência de envolver completamente um telemóvel com o material de isolamento térmico refletante de baixa emissividade utilizado nos ensaios e efetivamente aquele ficou sem sinal de rede.

3.3.2 USO DE FOLHAS DE ALUMÍNIO

Segundo a Associação Europeia de Folha de Alumínio ([Em linha]. Disponível em <<http://www.alufoil.org/>>) as propriedades essenciais das folhas de alumínio, cuja matéria prima é a bauxite, e que justificam o seu uso, são em especial o constituírem uma barreira à radiação, aos gases, ao vapor de água, ao aroma, são recicláveis, são resistentes ao fogo, são ótimos condutores do calor e da eletricidade e funcionam como barreira radiante.

A folha de alumínio tem várias utilizações desde embalagens para produtos alimentares (incluindo bebidas), para produtos farmacêuticos, para produtos cosméticos e de higiene, para tabaco, para evitar que os alimentos em certas partes sejam secos ou sobrecozidos nos aparelhos de micro-ondas (visto o alumínio não se deixar atravessar por micro-ondas), como forro de alimentos em churrascos, refletores para lâmpadas ou candeeiros, aproveitando a elevada condutibilidade térmica do alumínio, aplica-se em sistemas de permuta de calor (nomeadamente em relação às aletas) para edifícios, veículos rodoviários, aviões, navios, naves espaciais, refrigeração, isolamento térmico de edifícios e de tubagens, fitas adesivas, isolamento de cablagens de comunicação para evitar interferências de campos magnéticos e de ondas de rádio, proteção ao fogo em veículos, navios e portas, entre outros.

No respeitante às aplicações direcionadas para o isolamento térmico de edifícios, e tendo em conta, além das folhas refletantes de alumínio, todo o sistema associado, ressume-se, a seguir, algumas das principais vantagens do uso de ITRBEs como o que foi usado nos ensaios experimentais no âmbito deste trabalho:

- Interessante poder isolante com espessuras reduzidas de material;
- No Inverno restitui uma parte do calor gerado dentro da habitação para o interior da mesma e no Verão contribui para evitar o seu sobreaquecimento;
- Grande flexibilidade, sendo fácil contornar elementos construtivos como é o caso dos trabalhos de correção de pontes térmicas (como são exemplo os pilares) não sendo pois necessário executar cortes no material de isolamento;
- Cumpre as regras necessárias de segurança contra incêndio da maior parte da legislação e normas ligadas à construção;
- Não é quebradiço nem se desfaz com facilidade e na sua aplicação não requer ferramentas ou roupas especiais;
- Na sua aplicação não provoca lixo e/ou emissões de partículas em suspensão, que são nocivas à saúde e ao meio ambiente;
- Imputrescível;
- Não é tóxico, cancerígeno ou irritante;
- Eficaz barreira à difusão de humidade (não substituindo no entanto a tela de impermeabilização);
- Não é atacado por parasitas, insetos ou roedores e não é contaminado por fungos ou bactérias;
- Devido à película protetora que cobre o alumínio, possui boa resistência às argamassas, não sendo corroído por estas e tem resistência aos solventes exceto a hidrocarbonetos de cloro e alifáticos;
- Estabilidade dimensional;
- Resistência aos choques térmicos entre -15°C e os 80°C.

Por ser fundamental a avaliação do funcionamento destas películas como barreira à transmissão de calor por radiação, uma característica muito importante a saber é a sua emissividade. Para tal, os fabricantes submetem os seus produtos a ensaios, que são realizados por laboratórios reconhecidos, como foi o caso do produto usado no âmbito dos ensaios experimentais deste trabalho, em que as medições foram executadas pelo

NPL - Laboratório Nacional de Física do Reino Unido (National Physical Laboratory, 2001). Apresenta-se no Quadro 3.1 os resultados da emissividade espectral da superfície de alumínio, relativa ao intervalo considerado de comprimentos de onda de 5 μm a 50 μm .

Quadro 3.1

EMISSIVIDADE ESPETRAL DA SUPERFÍCIE DE ALUMÍNIO DO ISOLAMENTO REFLETANTE USADO

(National Physical Laboratory, 2001)

Temperatura	-10°C	0°C	10°C	20°C	30°C
Emissividade	0,0627	0,0628	0,0628	0,0629	0,0629

Na Figura 3.3 apresenta-se um exemplo de aplicação do material de isolamento térmico refletante de baixa emissividade, usado neste estudo, sob uma cobertura metálica dos escritórios da empresa fornecedora do mesmo, cuja conceção e acompanhamento da obra foi empreendido pelo autor, em que se evidencia algumas fases e cuidados fundamentais com este tipo de intervenção.

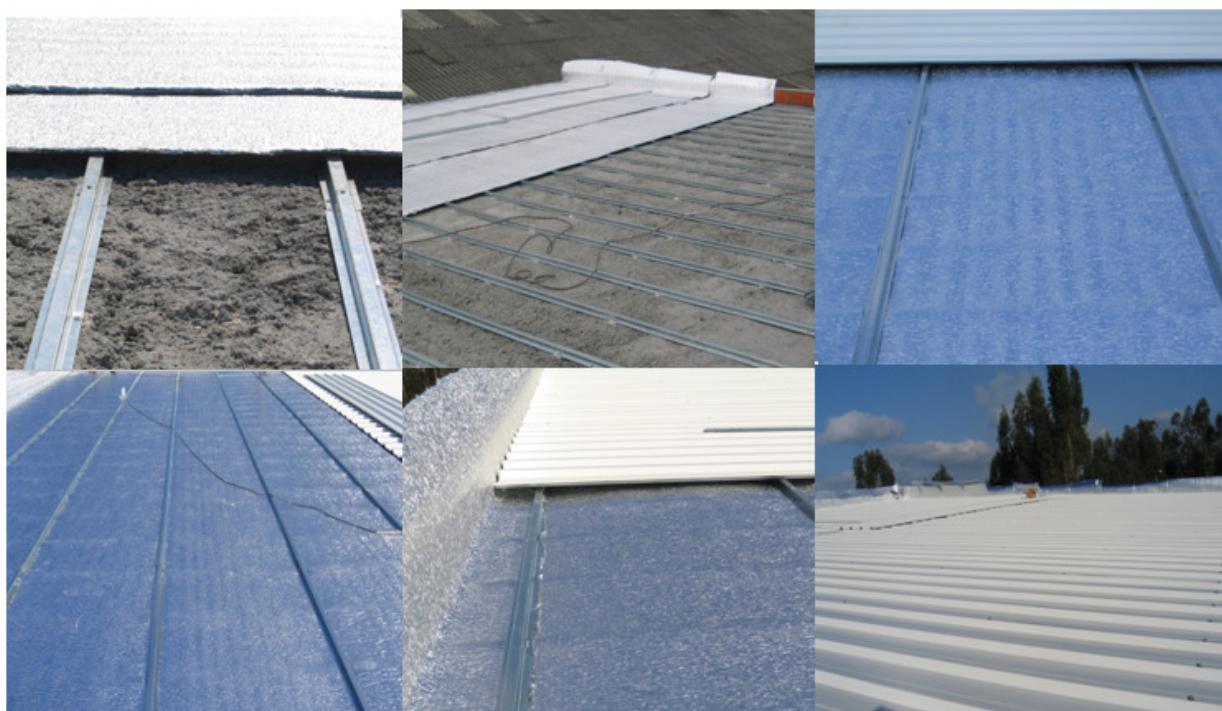


Figura 3.3 (a a f)
APLICAÇÃO DO ISOLAMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE
SOB UMA COBERTURA METÁLICA

Esta aplicação em coberturas deve pois seguir uma sequência de regras que são fundamentais para o sucesso desta intervenção, regras essas que o autor sintetizou nos passos e esquema que se apresentam a seguir:

- Deve-se desenrolar o ITRBE diretamente sobre o ripado, cuja dimensão deve permitir assegurar uma caixa de ar de 3 cm ou mais entre a laje e o ITRBE. As ripas deverão estar afastadas de 50 cm no máximo e as sobreposições do ITRBE devem possuir um mínimo de 5 cm;
- Deve-se aplicar o ITRBE bem esticado, fixando-o através da ligação das ripas superiores de apoio ao revestimento da cobertura, de modo a assegurar uma caixa de ar entre o isolamento e o revestimento de cobertura (que pode ser telha, chapa metálica, entre outros) de 3 cm ou mais. As ripas superiores deverão ser colocadas afastadas entre si de 50 cm no máximo e perpendicularmente às inferiores. Quando aplicada por baixo do ripado e sendo este de madeira, deve ser fixado com um agrafador de pressão. Os aplicadores deste sistema não devem andar diretamente sobre o material isolante;
- Para obter uma total vedação deve-se aplicar fita de alumínio nas juntas.

Na Figura 3.4. apresenta-se um esquema que retrata esta aplicação do ITRBE.

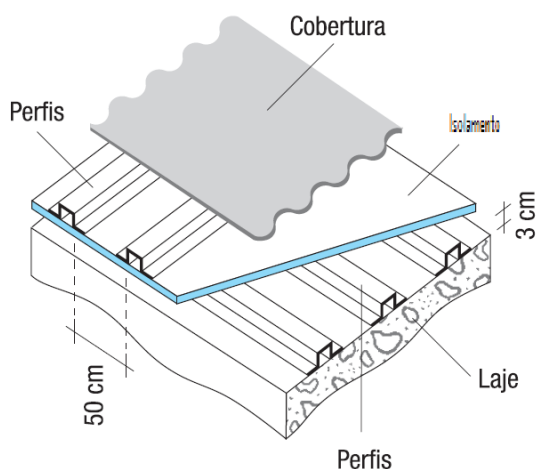


Figura 3.4
ESQUEMA DE APLICAÇÃO DO ISOLAMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE
EM COBERTURAS

Já na Figura 3.5, evidencia-se a colocação do mesmo tipo de ITRBE em paredes de fachada ventiladas (sendo que a fachada é em vidro) do edifício do casino da Figueira da Foz.

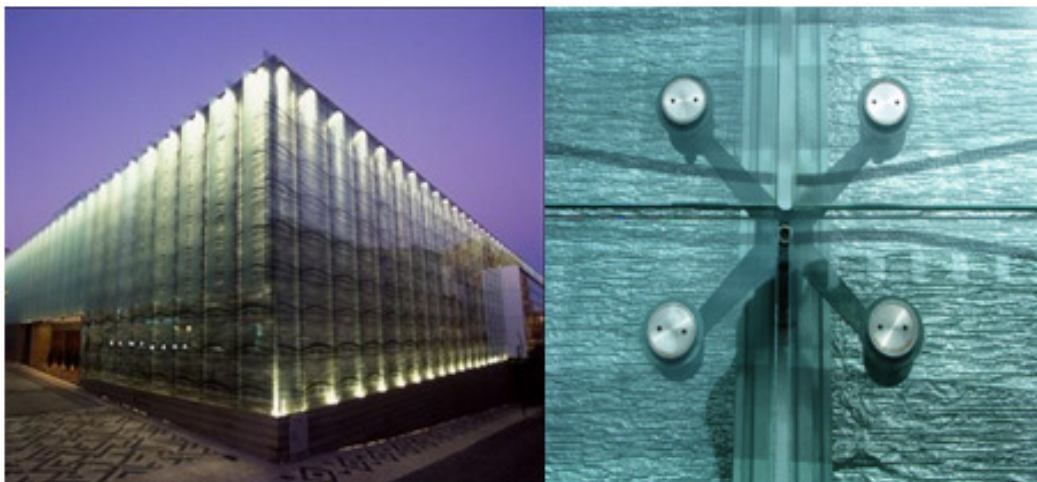


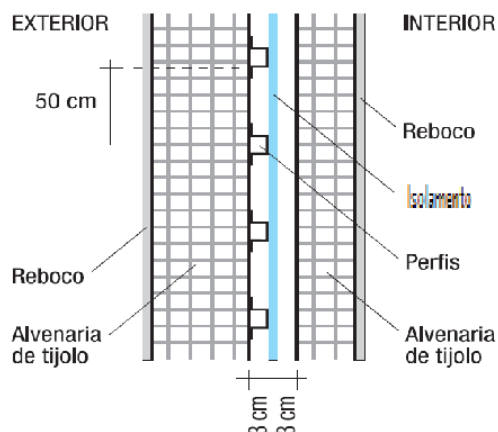
Figura 3.5 (a e b)

APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE NAS FACHADAS DO CASINO DA FIGUEIRA DA FOZ (a - [Em linha]. Disponível em < <http://www.viva-agenda.com/images/venues/1-CasinoFigueiraFoz.jpg>>)

Esta aplicação de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade em fachadas, deve também seguir uma sequência de regras que são fundamentais para o sucesso desta intervenção. No respeitante à aplicação de ITRBEs em paredes duplas, o autor sintetizou a mesma nos passos e esquema que se apresentam a seguir:

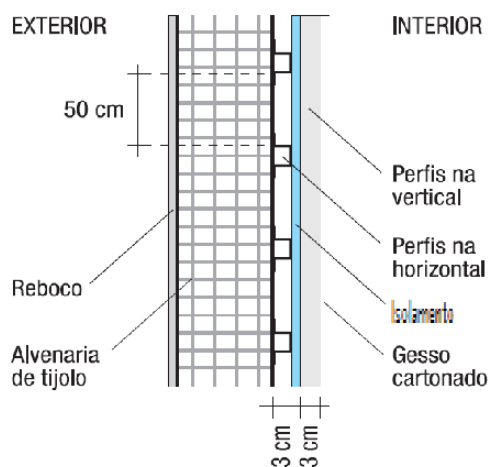
- Deve-se desenrolar o ITRBE, fixando-o aos perfis, distanciados entre si, no máximo, de 50 cm, de modo a obter-se uma caixa de ar de 3 cm ou mais;
- Deve-se levantar a parede interior de modo a constituir-se uma caixa-de-ar de 3 cm entre aquela e o material isolante. Com esta técnica pode-se construir primeiro a parede exterior e depois a interior, facilitando, assim, a construção das alvenarias;
- As sobreposições do ITRBE devem possuir um mínimo de 5 cm e para obter uma total vedação deve-se aplicar fita de alumínio nas juntas.

Na Figura 3.6 apresenta-se um esquema que retrata esta aplicação do ITRBE.

**Figura 3.6**

ESQUEMA DE APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE EM CAIXAS DE AR DE PAREDES DUPLAS

Caso a aplicação de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade (ITRBEs) seja pelo interior das paredes de fachada, segue-se a mesma técnica anterior com a diferença que como revestimento interior aplicam-se, por exemplo, placas de gesso cartonado. Na Figura 3.7 apresenta-se um esquema que retrata esta aplicação do ITRBE.

**Figura 3.7**

ESQUEMA DE APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE PELA SUPERFÍCIE INTERIOR DE PAREDES DE FACHADA

Se a aplicação do isolamento térmico refletante de baixa emissividade for efetuada pelo exterior das paredes de fachada, segue-se a mesma técnica especificada atrás, com a diferença que como revestimento exterior aplicam-se, por exemplo, placas de pedra natural ou até vidro que resultam em fachadas ventiladas com um efeito estético muito

interessante (ver Figura 3.5). Na Figura 3.8 apresenta-se um esquema que retrata esta aplicação do ITRBE.

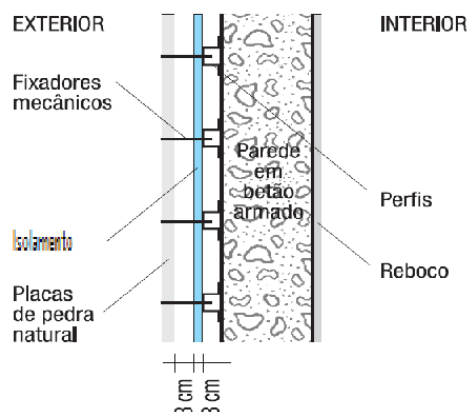


Figura 3.8

ESQUEMA DE APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE PELA SUPERFÍCIE EXTERIOR DE PAREDES DE FACHADA

Finalmente e no respeitante à aplicação de isolamento térmico refletante de baixa emissividade (ITRBE) em pavimentos e tetos falsos, segue-se na Figura 3.9 um esquema em que se prevê duas caixas de ar com espessura mínima de 3 cm, uma inferior e outra superior à laje.

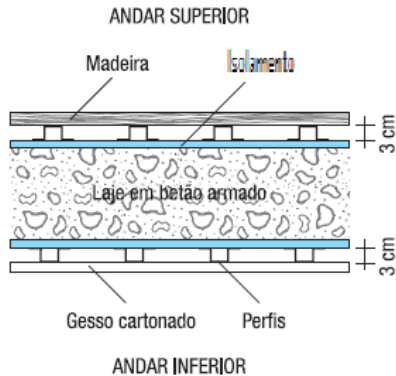
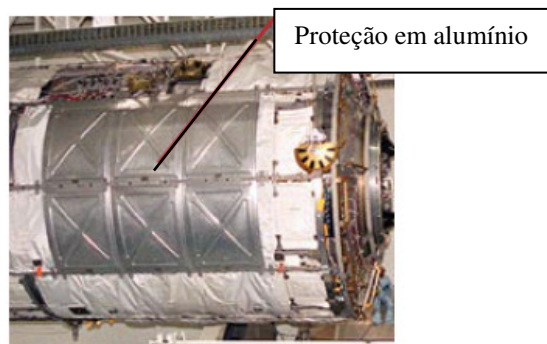


Figura 3.9

APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE EM PAVIMENTOS E TETOS FALSOS

Importa também referir, que existem painéis rígidos de partículas de madeira orientadas (OSB) revestidos a folha de alumínio e que são utilizados por exemplo nos EUA para a realização de sótãos com adequado isolamento térmico. Também, como já foi referido, uma das aplicações mais importantes dos materiais refletantes de baixa emissividade, constituídos por alumínio, é exatamente na indústria aeroespacial. Na Figura 3.10 apresenta-se a proteção existente num módulo da estação espacial internacional.

**Figura 3.10****PROTEÇÃO EM ALUMÍNIO NA ESTAÇÃO ESPACIAL INTERNACIONAL**

(NASA - International Space Station (ISS) – Interactive Reference Guide. [Em linha]. Disponível em <<http://www.nasa.gov/externalflash/ISSRG/pdfs/mmod.pdf>>)

No respeitante às aplicações do alumínio em embalagens de produtos alimentares, que inclusivamente podem ser reutilizadas para isolamento térmico refletante de baixa emissividade em edifícios, evidencia-se que em geral a folha de alumínio está incorporada num conjunto de lâminas de produtos de outra natureza. Estas embalagens, têm a vantagem de conservar sem refrigeração, por muitos meses, os produtos, desde que isentos de microrganismos (por isso é que por exemplo se ultrapasteuriza o leite para que ele possa ser conservado na embalagem durante 4 meses, sem que estes necessitem de conservantes, embora o uso de leite UHT também apresente desvantagens), sendo completamente recicláveis e constituídas por 75% de cartão, 20% de polietileno e 5% de alumínio (AFCAL - Associação de Fabricantes de Embalagens de Cartão para Alimentos Líquidos de Portugal. [Em linha]. Disponível em <http://www.afcal.pt/embalagens_composicao.php>). As camadas constituintes destas embalagens estão indicadas na Figura 3.11.

**Figura 3.11****CONSTITUIÇÃO DAS EMBALAGENS DE CARTÃO PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS**

(AFCAL - Associação de Fabricantes de Embalagens de Cartão para Alimentos Líquidos de Portugal. [Em linha]. Disponível em <http://www.afcal.pt/embalagens_composicao.php>)

Realça-se da Figura anterior que as duas folhas de polietileno interiores (camadas 6 e 5) têm como função evitar o contacto do líquido com a folha de alumínio (camada 4), sendo que esta tem como função o assegurar da durabilidade do produto alimentar, evitando a entrada da luz, do ar, da água e dos microrganismos. Quanto à camada seguinte de polietileno (3) esta tem a função de proporcionar a aderência da folha de alumínio à de cartão (2), sendo que esta camada permite a estabilidade necessária à embalagem, bem como a impressão dos rótulos, e finalmente, a camada de polietileno mais externa (1) protege a embalagem da humidade.

A camada de polietileno que reveste a película de alumínio, provoca que a emissividade respetiva desta superfície seja de 0,29 e não 0,05, sendo esta a emissividade do alumínio sem revestimento de polietileno (valores determinados pelo autor pelo procedimento descrito no Capítulo VII). Deste modo, seria adequado verificar a possibilidade de com alguma facilidade retirar essa camada de polietileno. Uma das ideias testadas pelo autor foi a de o fazer através do uso de calor proveniente de uma chama. Como se pode ver na Figura 3.12a, as películas de polietileno e cartão ardem mas não a folha de alumínio, que, sem a cobertura dos dois filmes de polietileno, apresenta mais brilho, ou seja, apresenta propriedades mais refletantes. De referir que nesta experiência se descolou previamente o cartão, do alumínio como é evidente na Figura 3.12b.



Figura 3.12 (a e b)
PORÇÃO DE PAREDE DE UMA EMBALAGEM DE CARTÃO PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS
SUBMETIDA AO FOGO

De seguida, na Figura 3.13, mostra-se uma outra experiência conducente à verificação do comportamento ao fogo de uma embalagem de cartão para alimentos líquidos que

íntegra, na sua constituição, uma folha de alumínio, em que desta vez não se descolou o cartão do alumínio. Verifica-se, pois, que desta vez, e com a consideração desta folha conjunta, a ação do fogo teve um impacto bem menor.

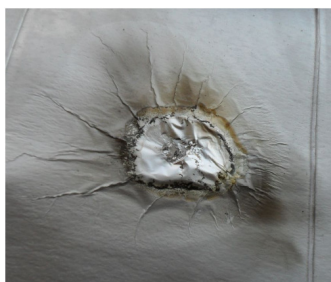


Figura 3.13
AÇÃO DO FOGO NAS PAREDES DE UMA EMBALAGEM DE CARTÃO PARA ALIMENTOS
LÍQUIDOS COM FOLHA DE ALUMÍNIO

Nesta experiência constata-se perfeitamente a destruição do revestimento em polietileno que está do lado interior das embalagens e aplicado por cima do alumínio, bem como a certo momento, a destruição da própria película de alumínio, permitindo tal verificar que aparentemente não é possível retirar por processos simples, como é o caso do usado da ignição de um fósforo, as películas de polietileno que estão na superfície interior das embalagens sem descolar o alumínio do cartão, pois verifica-se a destruição da película de polietileno que se situa entre eles. A possível retirada das películas superficiais de polietileno mantendo a ligação do alumínio ao cartão, seria com certeza interessante para a aplicação deste material nos edifícios na forma de mantas com elevado desempenho em termos de reflexão da radiação térmica.

É relevante referir que estudos executados no Brasil (Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica. [Em linha]. Disponível em <<http://www.fem.unicamp.br/~vidalong/projleite.html>>) concluíram que após 9 meses de exposição solar direta, mas sem contacto com a chuva, e devido ao envelhecimento sobretudo provocado pela radiação ultravioleta, as camadas de polietileno que recobrem o alumínio são totalmente destruídas, ficando este com todo o seu brilho. Deste modo, seria interessante, no sentido da reutilização destas embalagens para a função de isolamento térmico refletante de baixa emissividade (ITRBE) em edifícios, desenvolver um método eficiente e económico de retirar a película de polietileno da superfície do alumínio de modo a se conseguir uma maior refletividade, uma menor emissividade e uma menor ação do fogo nas superfícies dessas mantas. É igualmente interessante

referir que estas embalagens podem inclusivamente ser recicladas para a produção das designadas ecotelhas (Figura 3.14).



Figura 3.14
TELHA FABRICADA COM EMBALAGENS RECICLADAS DE CARTÃO PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS
(Portal Metálicas. [Em linha]. Disponível em <<http://www.metalica.com.br/ecotelhado>>)

Também, e ainda no domínio de soluções ecológicas com o uso deste tipo de embalagens, é importante citar a aplicação das designadas mantas térmicas. Estas mantas são realizadas a partir da ligação entre si por colagem ou por costura de embalagens, em geral de leite, que previamente foram abertas, planificadas e limpas (Figura 3.15). A aplicação mais comum destas mantas é como forro de telhados em que a face de alumínio é voltada para baixo. A Universidade Unicamp (Universidade Estadual de Campinas) no Brasil, desenvolveu o projeto designado por forro vida longa (Unicamp – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica. [Em linha]. Disponível em <<http://www.fem.unicamp.br/~vidalong/projleite.html>>) que ganhou em 2001 o Diploma Tecnologia Social instituído pela Fundação Banco do Brasil.



Figura 3.15
MANTAS TÉRMICAS DE EMBALAGENS DE CARTÃO PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS
(Unicamp – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica. [Em linha]. Disponível em <<http://www.fem.unicamp.br/~vidalong/projleite.html>>)

Outro uso ainda mais direto é a possibilidade da aplicação das embalagens, sem as planificar, na laje de esteira de edifícios, criando-se cumulativamente à minoração da transferência de calor por radiação, o efeito de isolamento resistivo devido à caixa-de-ar que é o interior das embalagens. Na Figura 3.16 mostra-se uma aplicação realizada por Carletto (2005).



Figura 3.16
APLICAÇÃO NA LAJE DE ESTEIRA DE EMBALAGENS DE CARTÃO PARA ALIMENTOS
LÍQUIDOS
(Carletto, 2005)

Na Figura 3.17 apresenta-se uma cobertura em que o autor aplicou na esteira esta solução do uso de embalagens de cartão para alimentos.



Figura 3.17
APLICAÇÃO NA LAJE DE ESTEIRA DE EMBALAGENS DE CARTÃO PARA ALIMENTOS
LÍQUIDOS NO EDIFÍCIO OBJETO DE ESTUDO PELO AUTOR

Outro exemplo de reciclagem de produtos que contêm películas de alumínio é o referente a tubos de pasta dentífrica que podem ser usados igualmente para a produção de ecotelhas. No projeto desenvolvido pelo Instituto para o Desenvolvimento da Habitação Ecológica do Brasil ([Em linha]. Disponível em < http://www.idhea.com.br/ecotelha_tubo.asp>) foram usados tubos de pasta dentífrica, que possuem uma composição de cerca de 75% de polietileno e 25% de alumínio e que não passaram no controlo de qualidade das empresas produtoras (Figura 3.18).



Figura 3.18

ECOTELHA PRODUZIDA COM TUBOS DE PASTA DENTÍFRICA RECICLADA
(Instituto para o Desenvolvimento da Habitação Ecológica do Brasil ([Em linha].
Disponível em < http://www.idhea.com.br/ecotelha_tubo.asp>)

3.3.3 USO DE PELÍCULAS POLIMÉRICAS METALIZADAS

Além de folhas de alumínio, podem usar-se películas poliméricas metalizadas, em geral com alumínio, que acabam por ser menos espessas (podendo chegar aos 0,5 μm), mais leves e mais baratas dos que as folhas de alumínio, mas com uma eficiência menor em termos de refletividade. É aplicado na superfície das películas poliméricas um revestimento metálico através do processo de deposição física de vapor. O metal, geralmente alumínio, é aquecido e evaporado em vácuo, sendo que, em seguida, condensa sobre a película fria de polímero que é desenrolado junto da fonte de vapor. Os filmes poliméricos mais comuns que são utilizados neste processo são os de polipropileno orientado - BOPP e os de poli(tereftalato de etileno) – PET (Oliveira et al., 2011).

CAPÍTULO IV

ESTADO DA ARTE E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 NOTA EXPLICATIVA

Ao longo deste capítulo, apresentam-se vários estudos sobre o desempenho dos isolamentos térmicos com revestimento refletante de baixa emissividade, organizados pelos respetivos países de origem (notar que no caso de para o mesmo estudo existirem autores de vários Países, a origem considerada do artigo é a do País em que um maior número de autores são oriundos, ou no caso desse número ser igual, escolhe-se o País do primeiro autor nomeado) sendo que em cada um se utiliza a designação que o respetivo autor deu para este tipo de isolamentos, realçando-se que as designações, em língua inglesa, internacionalmente mais usadas são as de *radiant barriers*; *reflective coutings* ou *reflective insulation products*.

4.2 ESTUDOS REALIZADOS EM PORTUGAL

No respeitante aos estudos realizados em Portugal, Matias (2001) refere-se a um estudo realizado no LNEC em 1995 (Santos e Matias, *cit. in* Matias, 2001) que teve o objetivo de estudar o comportamento relativo de vários tipos de proteções térmicas refletantes, usando para tal o dispositivo evidenciado na Figura 4.1.

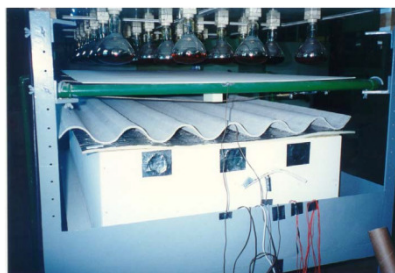


Figura 4.1

DISPOSITIVO USADO PELO LNEC PARA ESTUDAR O COMPORTAMENTO DE VÁRIOS TIPOS DE PROTEÇÕES TÉRMICAS REFLETANTES
(Santos e Matias *cit. in* Matias, 2001)

Neste dispositivo a fonte de radiação térmica é composta por um conjunto de lâmpadas de infravermelhos cuja potência foi ajustada de forma a simular o mais possível as condições verificadas num edifício real. A instrumentação do dispositivo permitiu a determinação de variáveis como a temperatura do ar tanto no seu interior como no exterior da “câmara”, bem como o balanço radiativo no seu interior, variáveis estas que foram utilizadas para a determinação da eficácia de cada proteção térmica refletante testada. Foram igualmente testados vários revestimentos exteriores da cobertura, nomeadamente chapas de fibrocimento, metálicas lisas e metálicas onduladas. Além do ensaio de várias soluções de proteções térmicas refletantes, foi também considerada, como solução de referência, uma situação sem qualquer uma dessas proteções. Para a consideração de chapa ondulada de fibrocimento como revestimento exterior da cobertura, verificou-se que em termos de comparação dos balanços energéticos, estes, com as proteções térmicas refletantes, variaram entre 7 e 41% em relação à solução de referência, sendo que a solução que proporcionou melhores resultados foi a constituída por duas folhas de papel *Kraft*-alumínio coladas com interposição de uma rede de reforço.

Realça-se que foi realizado um estudo similar (LNEC, 1998) em que se analisou as vantagens do uso de uma proteção térmica de um determinado fabricante, que solicitou a realização dos ensaios, tendo-se chegado a resultados de balanços energéticos de 398 Wh/m² e de 85 Wh/m² respetivamente para o caso de sem e com a aplicação da referida proteção, correspondendo, assim, a solução protegida a 21% em relação à solução de referência.

No que diz respeito a ensaios executados pelo LNEC para caracterizar as propriedades destas proteções térmicas constituídas por películas refletantes, verifica-se que em muitas das situações só é determinado o coeficiente de condutibilidade térmica seguindo a Norma Europeia EN 12667:2001, não se entrando, pois, com a ação de barreira à transmissão de calor por radiação. Em alguns destes ensaios realizados chegou-se mesmo a retirar as folhas de alumínio que revestiam as faces principais do material de isolamento (LNEC, 1999). Em alguns outros ensaios (LNEC, 1998a), realizou-se uma avaliação onde se entra em linha de conta com a ação da barreira à transmissão de calor por radiação, determinando-se um valor de resistência térmica equivalente que engloba também esta forma de transmissão de calor. Nestes ensaios efetuaram-se análises

comparativas em que num aplicou-se o isolamento num elemento construtivo, como é exemplo uma parede dupla, e no outro não se aplicou qualquer isolamento. Na aplicação da proteção na parede dupla, aquela foi aplicada na face interior do pano sujeito a aquecimento. Estes ensaios são normalmente executados em duas câmaras calibradas isoladas termicamente, sendo uma câmara quente e outra câmara fria. Após um período mínimo de funcionamento de 3 dias deve verificar-se se existem condições de estabilidade que permitam a execução do ensaio. No caso afirmativo determina-se a resistência térmica de cada solução, com e sem material isolante, pelo seguinte processo:

$$R = \frac{(T_{pq} - T_{pf}) * A}{P} \quad [4.1]$$

Em que:

- R: Resistência térmica em $m^2\text{°C/W}$;
- T_{pq} : Temperatura média da face quente do provete, em °C ;
- T_{pf} : Temperatura média da face fria do provete, em °C ;
- A: Área da superfície exposta do provete, em m^2 ;
- P: Potência elétrica fornecida à câmara quente, em Watts.

É pela diferença das resistências térmicas obtidas antes e depois da aplicação da proteção térmica refletante que se retiram conclusões sobre a eficácia destas soluções de isolamento à transmissão do calor. Em termos de resultados finais dos valores da resistência térmica obtidos por este estudo do LNEC, evidencia-se que ao aplicar-se a proteção térmica refletante passa-se de um valor de 0,43 para 0,84 $m^2\text{°C/W}$. É realçado pelo LNEC (1998a) que estes resultados são obtidos em condições bem definidas de laboratório não considerando, pois, diversos fatores que numa aplicação real afetariam o comportamento final do conjunto, como é o caso das condições de aplicação, o envelhecimento, as degradações e a influência de eventuais pontes térmicas planas e lineares.

Já em 2001, foi realizado um estudo do desempenho térmico, em condições reais, de proteções térmicas refletantes aplicadas em coberturas inclinadas (Matias, 2001), sendo para esse efeito, utilizadas duas células experimentais devidamente instrumentadas, localizadas no Campus do LNEC, com dimensões e características construtivas idênticas nas quais foram ensaiados vários tipos de proteções refletantes comercializadas no

mercado, com o objetivo de caracterizar-se o desempenho destes materiais bem como o de se comparar entre si as respectivas capacidades de proteção térmica. Cada célula era constituída por dois espaços, o desvão de cobertura e o espaço inferior, simulando este um compartimento útil. Numa das células de ensaio foram sucessivamente colocados, para análise, seis tipos de proteções térmicas refletantes e na célula de referência, nenhuma dessas proteções foi aplicada. A instalação das proteções térmicas refletantes nas vertentes da cobertura foi realizada seguindo dois processos. O primeiro consistiu na aplicação imediatamente sob as chapas de revestimento da cobertura e o segundo foi fixado nas madres de madeira de forma a se constituir uma caixa de ar com a espessura mínima de 9 cm. Na Figura 4.2 mostram-se imagens dessas aplicações.



Figura 4.2(a e b)
MODOS DE APLICAÇÃO DAS PROTEÇÕES REFLETANTES NAS VERTENTES DA COBERTURA
(Matias, 2001)

Ambas as células foram interiormente instrumentadas da mesma forma e deste modo mediram-se os parâmetros temperatura do ar, temperaturas superficiais, temperaturas médias radiantes, humidades relativas, balanços radiativos e fluxos de calor. Realça-se que estes ensaios foram realizados com as proteções térmicas refletantes perfeitamente limpas, sem pó ou qualquer sujidade, situação que com o passar do tempo não acontece e que com exceção de um, todos os ensaios foram realizados em condições térmicas de verão.

No respeitante aos resultados dos ensaios no período de verão, Matias (2001) retirou as seguintes conclusões:

- Em relação à temperatura superficial das chapas de revestimento, as temperaturas médias são muito semelhantes nas duas células. Em relação aos valores máximos, que ocorrem no período diurno, estes são bastantes superiores na célula com proteções

refletantes e em relação aos valores mínimos, que ocorrem no período noturno, os valores são superiores na célula sem essas proteções;

- Em relação às temperaturas superficiais na esteira, os valores máximos e mínimos, sobretudo os primeiros, foram sempre obtidos na célula sem aplicação de proteção térmicas refletantes. Estes resultados mostram que durante o dia a temperatura na esteira é substancialmente maior na célula de referência enquanto durante a noite é ao contrário, sendo que em termos de valores absolutos se verifica que o diferencial de temperaturas durante a noite é menor do que durante o dia. No respeitante aos valores médios obtidos verifica-se que na célula de referência estes são superiores entre 0,4°C e 2,0°C aos valores obtidos na célula com proteções térmicas refletantes;

- As temperaturas médias e máximas do ar do desvão são em geral superiores na célula de referência, obtendo-se diferenças significativas quanto aos valores máximos. Já para as temperaturas mínimas estas atingem valores mais baixos na célula de referência. Deste modo, verifica-se que em termos de amplitude térmica do desvão esta é significativamente mais baixa nas células que possuem a proteção térmica refletante;

- Verifica-se que em relação à temperatura média do ar exterior, os valores médios das temperaturas nos desvãos das coberturas são sempre superiores nas duas células. Já no respeitante à temperatura máxima exterior esta é sempre significativamente ultrapassada pelos valores máximos atingidos na célula de referência, enquanto para a restante célula, nas suas várias configurações, os valores são muito semelhantes, sendo em alguns casos até inferiores;

- É na célula de referência que se atingem valores significativamente mais elevados do fluxo de calor máximo que atravessou a esteira horizontal, bem como valores significativamente mais baixos do fluxo mínimo, ou seja, no último caso, fluxos ascendentes maiores em termos absolutos, sendo assim a célula de referência é aquela em que os fluxos de calor que atravessam a esteira horizontal são superiores;

- Durante o período diurno existe na célula de referência um fluxo de calor significativamente maior do desvão para o compartimento interior enquanto durante a noite existe um fluxo de calor significativamente maior do interior do compartimento para o desvão;

- Em termos médios diários, o fluxo de calor é praticamente sempre descendente e apresenta valores mais elevados na célula de referência;

- O calor (fluxo descendente) que penetra no compartimento inferior (período diurno) é significativamente inferior na célula em que se aplicaram as várias proteções térmicas refletantes, variando essa redução entre os 46% e os 81%;
- O calor (fluxo ascendente) que penetra no desvão (período noturno) é significativamente inferior na célula em que se aplicaram as várias proteções térmicas refletantes, variando essa redução entre os 48% e os 82%, podendo assim concluir-se que as referidas proteções dificultam o arrefecimento do compartimento inferior;
- As temperaturas médias e máximas no compartimento inferior são superiores na célula de referência enquanto as temperaturas mínimas são muito semelhantes. Comparativamente aos resultados obtidos das amplitudes térmicas nos desvãos de cobertura, realça-se que o uso das proteções implicou no compartimento inferior menores valores do que os obtidos na célula de referência, permitindo tal a Matias (2001) concluir que o uso daquelas proteções é mais vantajosa em situações de desvão habitado ou naves industriais com proteção à vista. Realça-se, igualmente, que a diminuição verificada nos fluxos de calor, que em período diurno atravessam em sentido descendente a esteira, praticamente equilibra a diminuição do fluxo de calor ascendente que durante a noite se verifica através da mesma esteira quando se usam as proteções térmicas refletantes. Deste modo, embora durante o dia se consiga o benefício das temperaturas serem mais baixas no compartimento inferior, durante a noite existe dificuldade acrescida no arrefecimento do mesmo. De forma a minorar esta dificuldade, Matias (2001) refere que se o desvão de cobertura em vez de ser fracamente ventilado fosse fortemente ventilado, a situação poderia ser mais vantajosa pois tal aumentaria as trocas de calor ascendentes do compartimento para o desvão e daí para o exterior. Deste modo, a questão da ventilação efetuada tanto no desvão de cobertura como no compartimento inferior é uma questão fundamental a ter em conta, a par da aplicação das proteções térmicas refletantes;
- Dentro de todas as proteções refletantes usadas, a que teve melhor comportamento foi a amostra constituída por espuma de polietileno (PEF) de 10 mm de espessura revestida em ambas as faces com folha de alumínio polida, com caixa de ar entre esta e o revestimento exterior. Esta amostra ao possuir películas de alumínio polido em ambas as faces, reflete uma parcela significativa da radiação térmica proveniente do revestimento exterior, ao mesmo tempo que emite muito pouco para o desvão de cobertura;

Em relação ao ensaio efetuado em período de inverno, em que previamente se conseguiu a manutenção de ambas as células à temperatura de 25°C, Matias (2001) concluiu que a aplicação da proteção térmica refletante nas vertentes da cobertura, em que o desvão é fracamente ventilado, permitiu uma redução do consumo de energia de aproximadamente 8%.

Sousa (2014) realizou um estudo, com recurso ao programa de simulação dinâmica Design Builder, sobre a utilização de tintas, com alta refletância e alta emissividade, na envolvente exterior dos edifícios chegando às seguintes conclusões principais:

- As propriedades atribuídas pelos fabricantes a essas tintas estão sobrevalorizadas;
- A aplicação destas tintas na superfície exterior das paredes exteriores dos edifícios diminui a temperatura radiante no interior, sendo que, no entanto, esse impacto não é muito elevado;
- O maior impacto da utilização destas tintas ocorre nas temperaturas superficiais exteriores das fachadas, chegando-se a diferenças de menos 15°C;
- A influência da aplicação destas tintas nas temperaturas interiores de um edifício é maior quando este é constituído por paredes exteriores menos isoladas. Numa situação de fachadas constituídas por paredes simples chegou-se a uma diminuição da temperatura interior do edifício que ultrapassou os 2°C;
- Quando se simula a aplicação da tinta também na cobertura, no caso das paredes exteriores serem duplas, verificou-se uma diminuição suplementar na temperatura interior de cerca de 1,3°C;
- Verificou-se que a aplicação da tinta nas paredes exteriores exerce maior impacto no período diário de menor calor, enquanto a aplicação da tinta na cobertura tem um melhor desempenho no período do dia de maior calor.

Gonçalves et al. (2014) realizaram uma avaliação do desempenho térmico de tintas refletantes aplicadas na superfície exterior de fachadas com ETICS, com recurso a análise termográfica, tendo chegado às seguintes conclusões principais:

- O uso destas tintas em fachadas constitui uma solução válida na diminuição da temperatura superficial, possibilitando uma diminuição dos ganhos térmicos através da envolvente, situação muito benéfica no período de verão, resultando no menor consumo de energia para arrefecimento;

- Estas tintas provocam uma maior durabilidade da solução construtiva do revestimento ETICS de fachadas, pois estas tintas permitem reduzir consideravelmente a sua temperatura superficial externa, em especial nos períodos de maior intensidade da radiação solar;
- As tintas de cor mais clara permitem, face às cores escuras, a ocorrência de temperaturas superficiais mais baixas.

Costa e Santos (2014) apresentam um estudo experimental de avaliação de produtos de alta refletância na reabilitação de coberturas planas, em condições reais de exposição, sendo que para tal foram usadas duas células experimentais localizadas no campus do LNEC. As conclusões principais a que chegaram foram as seguintes:

- As soluções de alta refletância têm um efeito benéfico de proteção térmica durante o verão, promovendo uma melhoria das condições de conforto térmico no interior de espaços não climatizados e uma diminuição do consumo de energia e dos requisitos de potência dos equipamentos associados a espaços climatizados;
- Como o uso de produtos de alta refletância provocam uma diminuição dos ganhos solares pela cobertura, na estação de inverno verifica-se um aumento das necessidades de energia para o alcançar do conforto térmico;
- Na estação de verão, o uso de proteções de alta refletância, provocou uma diminuição da temperatura média do ar interior, ao longo deste período, de 6,8°C e atingiu-se uma redução da temperatura máxima de 7,2°C. Na estação de inverno, e em contrapartida, resultou uma redução da temperatura média do ar interior em 1,1°C e atingiu-se uma redução da temperatura máxima de 1,6°C;
- Em relação à carga de arrefecimento, o uso destas proteções na cobertura plana, resultou numa diminuição do consumo de energia elétrica em 1 kWh/dia, usando uma bomba de calor, mas quanto à carga de aquecimento existiu um aumento de 3,5 kWh/dia usando um sistema com resistência elétrica. No entanto caso se usasse a mesma bomba de calor também para o aquecimento ambiente, o aumento de consumo previsto seria de aproximadamente 0,6 kWh/dia.

4.3 ESTUDOS REALIZADOS NO BRASIL

Em 1999 foram realizados, no campus do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, ensaios de campo realizados em protótipos unicompartimentados com o

objetivo de se efetuar uma avaliação comparativa do desempenho térmico de uma cobertura com e sem o uso de isolamento térmico refletante (Akutsu e Vittorino, 1999). Os dois protótipos cujos revestimentos das coberturas foram constituídos por telhas de aço galvanizado, envelhecidas, não possuíam esteira horizontal. Num dos protótipos foi colocada, na face interna do telhado, a proteção térmica refletante, constituída por material polimérico constituído por bolhas de ar uniformemente distribuídas (plástico bolha) e revestido a alumínio nas duas faces. O outro protótipo não foi isolado termicamente na cobertura, sendo que ambos os protótipos tinham as paredes isoladas termicamente de modo a que a maior parte das transferências de calor fosse realizada através da cobertura. Apresenta-se na Figura 4.3 os resultados das temperaturas do ar exterior e interior dos dois protótipos.

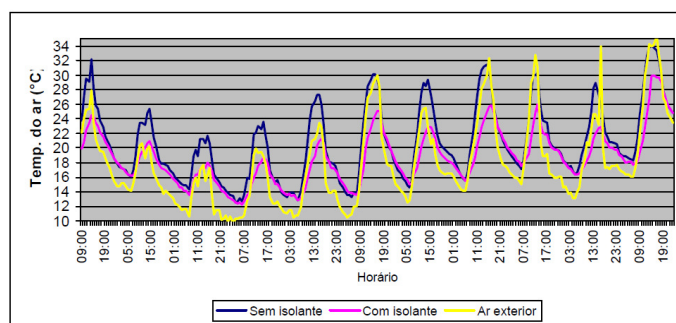


Figura 4.3

RESULTADOS DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR NO ESTUDO DE AKUTSU E VITTORINO (Akutsu e Vittorino, 1999)

Também se mediram as temperaturas médias radiantes nos dois protótipos através do uso de termômetros de globo negro. Os respectivos resultados apresentam-se na Figura 4.4.

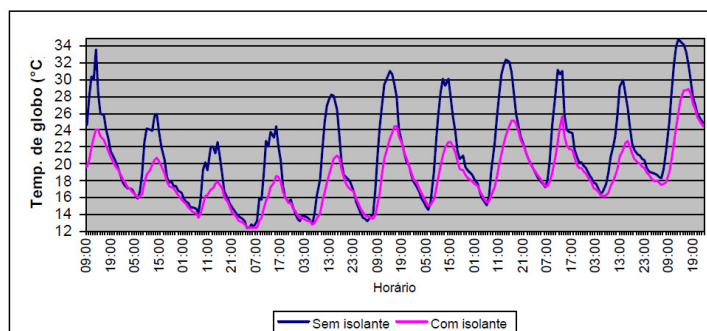


Figura 4.4

RESULTADOS DA TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE NO ESTUDO DE AKUTSU E VITTORINO (Akutsu e Vittorino, 1999)

Igualmente se mediram as temperaturas superficiais internas e externas do revestimento em telha, tendo-se apresentado os respectivos gráficos de evolução temporal. Pela análise destes resultados, Akutsu e Vittorino (1999) concluíram que existem significativas diferenças entre as temperaturas atingidas nos dois protótipos.

Verificaram que no período das 9 às 15h, no protótipo com isolamento na cobertura, a temperatura do ar foi em média inferior em 6°C e a temperatura radiante em 7,7°C do que o ocorrido no protótipo não isolado, ficando, assim evidente a vantagem da introdução do isolamento térmico na cobertura. Em relação às temperaturas superficiais inferiores da telha, existiram períodos em que o protótipo sem isolamento apresenta valores superiores em 15°C à situação com isolamento. Já no respeitante à temperatura superficial exterior da telha, verifica-se que a amplitude térmica na situação com isolamento é maior do que sem isolamento, atingindo pois na primeira situação valores da temperatura máxima superiores e da mínima inferiores.

Akutsu e Vittorino (1999) referem que estes resultados derivaram da contribuição tanto da parte resistiva como da parte refletiva que o material de isolamento térmico proporciona. Além disso é apontada a contribuição dos espaços de ar que se formaram entre a telha de formato trapezoidal e o isolamento térmico.

Em 2001 é apresentado um estudo (Vecchia, 2001), cujo objetivo foi a avaliação do comportamento térmico de uma moradia unifamiliar ocupada, em uso normal, em que numa primeira fase não se aplicou qualquer material de isolamento térmico e numa segunda fase aplicou-se um material de isolamento térmico por reflexão, constituído por uma folha de alumínio. O objetivo do trabalho foi a comparação das duas situações de forma a concluir-se qual o alcance das vantagens em aplicar estes isolamentos refletantes. A moradia, situada em São Carlos – São Paulo, possuía uma cobertura de telha cerâmica suportada por estrutura de madeira e por baixo um forro constituído por régulas, também em madeira, que se encaixam. Na Figura 4.5 mostra-se a cobertura a ser submetida à intervenção de aplicação da folha de alumínio, que como se pode constatar foi colocada por cima das terças e por baixo das ripas, formando assim duas caixas-de-ar.



Figura 4.5

APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO REFLETANTE NA COBERTURA DO ESTUDO DE VECCHIA
(Vecchia, 2001)

Em relação a um primeiro período de medição e para a situação de antes da aplicação do isolamento refletante, verificou-se que em todos os dias existiram períodos em que se ultrapassaram os 30°C na temperatura interior, considerado por Vecchia (2001) como sendo o limite superior do conforto térmico. Também se verifica que a temperatura interior mesmo durante a noite é sempre superior a 20°C. Deste modo, o problema térmico neste período de medição é efetivamente o excesso de calor. Verificou-se, também, neste estudo, que os valores das temperaturas máximas superficiais nas paredes são substancialmente inferiores às superficiais do forro de madeira e do ar interior, podendo, assim, concluir-se que as paredes face à cobertura têm uma influência reduzida em relação à temperatura atingida dentro da habitação. É também importante evidenciar que nesta habitação ensaiada não existiu entrada de radiação solar direta através de vãos em nenhum período do dia.

Num segundo período de medição foi instalado, na cobertura, o isolamento térmico refletante, neste caso com emissividade de 0,03 e refletividade de 95%. De forma a proporcionar-se uma comparação conclusiva, este segundo período de medição foi considerado climaticamente compatível com o primeiro. Analisando os resultados obtidos, verificou-se uma grande diminuição, no valor de 8,6°C, da amplitude térmica diária das temperaturas superficiais médias do forro face à situação sem isolamento refletante. Quanto às temperaturas superficiais máximas do forro, estas, com o isolamento, diminuíram 8,7°C. Quanto às temperaturas mínimas estas mantiveram-se praticamente as mesmas. Já no respeitante à temperatura média do ar interior da habitação, a redução obtida com a aplicação do isolamento refletante foi de 5,1°C. É de realçar, que no segundo período, a temperatura do ar interior nunca ultrapassou os 30°C e a temperatura superficial do forro nunca ultrapassou o valor máximo da temperatura exterior do ar, ao contrário do que se passou no primeiro período. Deste modo

confirmou-se que os valores das temperaturas do ar interior e superficiais dependem fortemente do sistema de cobertura utilizado e que o uso de materiais de isolamento térmico refletantes são extremamente úteis no sentido de proporcionar um bom ambiente térmico interior das habitações, sobretudo em climas quentes e com grandes amplitudes térmicas, bem como na poupança acentuada de energia despendida com a respetiva climatização. Vecchia (2001) chama no entanto à atenção para o facto que o comportamento deste tipo de isolamentos depende de inúmeros parâmetros como seja o clima (em especial o grau de exposição das superfícies à radiação solar direta), das características da vizinhança (como é o caso do calor refletido pelas superfícies envolventes ao edifício em estudo, da ventilação e das zonas verdes existentes na zona de implantação), das estratégias de projeto implementadas no próprio edifício que potenciam a relação benéfica com o ambiente exterior (ventilação natural, sombreamentos dos vãos envidraçados, uso de cores claras, entre outros).

Em 2003 é apresentado um estudo (Vittorino; Sato e Akutsu, 2003), cujo objetivo foi a avaliação do desempenho térmico de *barreiras radiantes* aplicadas como forro de coberturas em estrutura de madeira revestidas a telha cerâmica Francesa. Esta avaliação recorreu tanto a modelos matemáticos, nomeadamente no respeitante ao cálculo do fluxo de calor irradiado usando o método do circuito elétrico equivalente, como a modelos físicos em que se avaliou através de testes laboratoriais a emissividade dos materiais. Este estudo, além de evidenciar a vantagem do uso de *barreiras radiantes* como forro de coberturas, alerta para a diversidade de materiais de isolamento existentes no mercado, que nem sempre apresentam os resultados esperados, bem como para as várias possibilidades de aplicação destas proteções térmicas nas coberturas, evidenciando-se aquelas que maximizam o desempenho térmico ao longo do tempo, nomeadamente que são menos influenciadas pela acumulação de detritos e poeira e à formação de manchas.

É focado neste estudo que as características de emissividade dos materiais dependem unicamente das características superficiais dos mesmos, até sensivelmente 1 μm de profundidade, pois a energia emitida pelas moléculas localizadas mais para o interior do material é absorvida pelas adjacentes não chegando assim a sair para o ambiente exterior (Incorpera, *cit. in* Vittorino; Sato e Akutsu, 2003). O mesmo se passa para a absorção e reflexão da radiação em que unicamente a camada superficial do corpo

contribui. É também referido que a absorção da radiação térmica superficial dos materiais é função da quantidade de elétrons livres existentes sendo que nos materiais condutores de eletricidade, como é o caso dos metais, eles existem em grande quantidade provocando assim a reflexão de grande parte dessa radiação. Apresentam igualmente um diagrama onde para materiais de construção correntes opacos constam as propriedades de emissividade e refletividade à radiação infravermelha longa, bem como a absortividade e a refletividade à radiação solar (Figura 4.6).

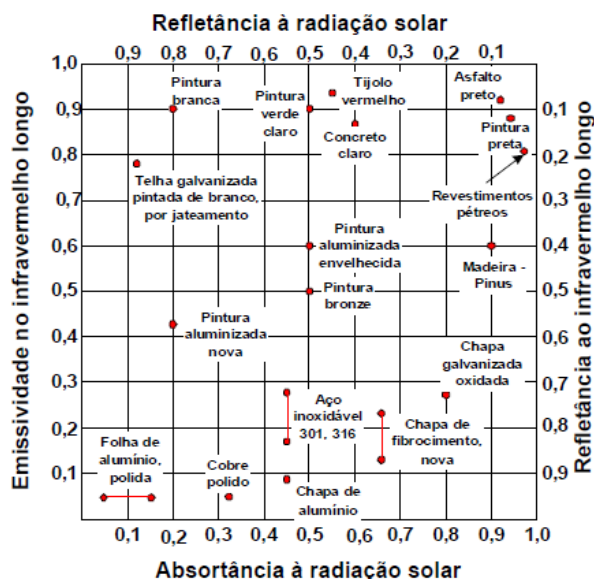


Figura 4.6

COMPORTAMENTO À RADIAÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO OPACOS

(Fairey *cit. in* Vittorino, Sato e Akutsu, 2003)

Referiu-se neste estudo que, por exemplo, na Austrália, já desde 1976 (AS *cit. in* Vittorino; Sato e Akutsu, 2003) existe normalização específica para isolamentos refletantes e na África do Sul tal existe desde 1985 (SSA *cit. in* Vittorino; Sato e Akutsu, 2003). Evidenciou-se, ainda, que os EUA é um País que dispõe de variadas normas nesta área.

Vittorino; Sato e Akutsu (2003) adotaram para o cálculo do fluxo de calor irradiado, diversos valores para as emissividades das superfícies dos materiais. Para a superfície inferior e superior do telhado considerou-se 0,9 enquanto para as superfícies inferior e superior do forro consideraram-se as várias combinações possíveis com valores de 0,15 e 0,9.

No respeitante às temperaturas, considerou-se que a temperatura da superfície inferior do telhado estava a 70°C e a temperatura média radiante do ambiente interior a 25°C. Realça-se que o forro está em contacto direto com o ambiente interior, não existindo laje de esteira. Apresenta-se no Quadro 4.1 os resultados do estudo empreendido.

Quadro 4.1
RESULTADOS DO ESTUDO DE VITTORINO, SATO E AKUTSU
(Vittorino, Sato e Akutsu, 2003)

Emissividade		Temperatura da superfície inferior do forro (°C)	Fluxo de calor para o ambiente (W/m ²)	Redução do fluxo de calor em relação à situação sem forro (%)
Face superior do forro	Face inferior do forro			
0,15	0,90	33,2	42	85
0,90	0,15	62,6	42	85
0,15	0,15	49,8	25	91
0,90	0,90	49,8	138	50
Sem forro			276	Referência

Realça-se que o uso de um forro com alta emissividade nas duas faces ($\varepsilon=0,9$) provocou um fluxo de calor 50% do originado na situação sem forro, o que evidencia a vantagem da existência de uma esteira horizontal convencional. Se uma das superfícies do forro possuir baixa emissividade ($\varepsilon =0,15$) o fluxo de calor atinge 15,2% da situação sem forro e 30,4% da situação do forro com ambas as superfícies com $\varepsilon =0,9$. É também de realçar que, sob o ponto de vista de redução do fluxo de calor, não se verificam vantagens entre colocar a superfície de baixa emissividade na superfície superior ou na inferior do forro. Ao colocar-se essa superfície por cima ativa-se as suas propriedades de alta reflexão térmica e ao colocar-se por baixo ativa-se as respetivas propriedades de baixa emissividade. Contudo, e tendo em conta as temperaturas obtidas na superfície inferior do forro, verificou-se que a consideração da superfície de menor emissividade por baixo aumentou substancialmente o valor da temperatura superficial. Este fenómeno ocorre pois o forro ao possuir a superfície de maior coeficiente de absorção na parte de cima aquece significativamente mais e a baixa emissividade da parte de baixo dificulta a libertação desse calor. No entanto, tendo em conta a funcionalidade deste sistema com o tempo e devido à deposição de poeira e de vários detritos na superfície superior do forro, recomenda-se o uso da barreira radiante na superfície inferior do mesmo. Considerou-se, ainda, o uso de duas superfícies de baixa emissividade uma por cima e outra por baixo do forro. Para esta situação e para $\varepsilon = 0,15$ o fluxo de calor é de 9,1% da situação padrão sem forro, 18,1% da situação do forro com as duas superfícies de alta emissividade e 59,5% da situação de uma só superfície de baixa emissividade. É pois

claro que sob o ponto de vista de fluxo de calor, não colocando no entanto a problemática da deposição da poeira na superfície superior do forro, é muito mais vantajoso possuir-se as duas superfícies do forro revestidas com materiais de baixa emissividade.

Já no que diz respeito às temperaturas na superfície inferior do forro é relevante evidenciar que para as duas superfícies revestidas com materiais de baixa emissividade o respetivo valor foi superior em 50% à correspondente situação de só existir na face superior a superfície de baixa emissividade. A explicação para tal fenómeno é que a face inferior possuindo alta emissividade dispersa mais facilmente o calor (que passou pela superfície superior) para o ambiente inferior do que tendo baixa emissividade. Note-se que o poder refletante da barreira radiante pode ser prejudicado, além da acumulação de poeira e detritos, pela corrosão resultante de reações entre poluentes aéreos e o metal constituinte da superfície e pela presença de humidade que com a poeira provoca manchas.

Ainda no âmbito deste estudo Vittorino; Sato e Akutsu (2003) realizaram em laboratório medições da emissividade dos materiais, permitindo tal agrupar os mesmos em três categorias: Os materiais com superfícies metálicas contínuas que apresentam normalmente emissividades inferiores a 0,15, os materiais com superfícies parcialmente ou descontinuamente metalizadas que apresentam emissividades entre 0,3 e 0,5 e finalmente os materiais com superfície metálica totalmente revestida com material polimérico transparente à radiação visível que apresenta normalmente emissividades superiores a 0,7. Estes últimos materiais estão pois muito longe de poderem ser integrados dentro da classificação de *barreiras radiantes*, sendo tal pois mais um alerta para o desempenho real destes materiais em obra.

No respeitante à alteração das propriedades da emissividade, das *barreiras radiantes*, com a acumulação de poeira, foi realizado no âmbito deste estudo um ensaio à escala real, como se mostra na Figura 4.7.



Figura 4.7
APLICAÇÃO DE BARREIRAS RADIANTES COMO FORRO DE COBERTURA
(Vittorino, Sato e Akutsu, 2003)

Este sistema construtivo ficou exposto ao ambiente durante sete meses, tendo-se o efetuado medições em relação à emissividade antes desta exposição, obtendo-se o valor de $\varepsilon = 0,12$. Após os sete meses de exposição, voltou a medir-se a emissividade da barreira e chegou-se ao valor de $\varepsilon = 0,40$. Ou seja, conclui-se que com a exposição ao ambiente durante sete meses a emissividade da barreira radiante aumentou cerca de 3,3 vezes. Este resultado torna pois evidente que no caso da aplicação de um material que só apresente uma superfície de baixa emissividade esta deve estar localizada na superfície inferior da barreira e não na superfície superior da mesma.

Em 2005 foi efetuado um estudo em que se avaliou através de ensaios experimentais num modelo reduzido (Figura 4.8) cinco tipos de sistemas de isolamento de coberturas de telha cerâmica, comparando-os com a situação de referência que foi a situação da inexistência de qualquer forro ou subcobertura, sendo esta a designação usada pelos autores do estudo (Daré, Targa e Isa, 2005).

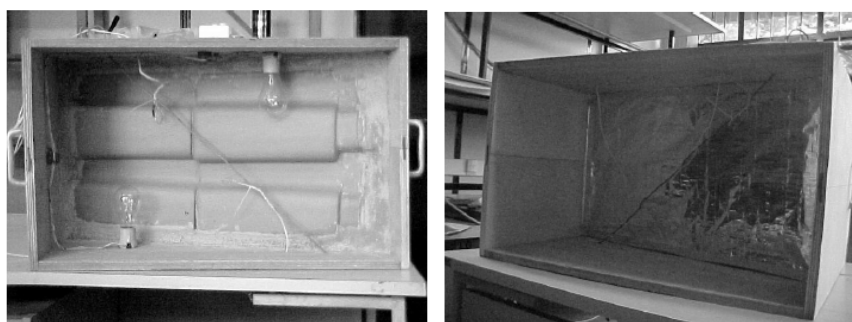


Figura 4.8 (a e b)
MODELO REDUZIDO PARA ENSAIOS NO ESTUDO DE DARÉ, TARGA E ISA
(Daré, Targa e Isa, 2005)

Os sistemas testados foram então os seguintes:

- Referência: Sem subcobertura;
- Subcobertura 1: Folha de polietileno entre duas folhas de alumínio com espessuras de 7 e 9 micrones;
- Subcobertura 2: Espuma de polietileno de 2 mm de espessura entre duas folhas de polímero aluminizado;
- Subcobertura 3: Espuma de polietileno de 2 mm com colagem somente em uma das faces de uma folha de polímero aluminizado;
- Subcobertura 4: Espuma de polietileno de 5 mm de espessura com colagem em uma das faces de uma folha de polímero aluminizado;
- Subcobertura 5: Somente espuma de polietileno de 5 mm de espessura.

Como fonte da radiação foram usadas duas lâmpadas incandescentes de 150 W de potência. Em termos dos valores médios de temperatura do ar no interior, os resultados obtidos, após 3 horas de ensaio, foram os apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2
VALORES MÉDIOS DE TEMPERATURA DO AR NO INTERIOR DO MODELO DE DARÉ,
TARGA E ISA
(Daré, Targa e Isa, 2005)

Característica do Modelo	SUBCOBERTURA					
	Sem subcobertura	1	2	3	4	5
Temperatura Média (°C)	48,80	41,67	42,37	45,63	46,67	47,43
Diferenças de temperatura (°C)	Referência	7,13	6,43	3,17	2,13	1,37

Verifica-se, pois, que a subcobertura 1 provoca, face ao modelo de referência, um abaixamento da temperatura de 14,6%, enquanto a subcobertura 5 provoca somente um abaixamento de 2,8%.

Daré; Targa e Isa (2005) usando os valores obtidos das temperaturas e as equações do arrefecimento de Newton e da Lei de Fourier apresentadas por Incropera e DeWitt (2008), chegaram, ao fim do período das 3 horas de ensaio, aos valores dos fluxos de calor apresentados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3
VALORES CALCULADOS DO FLUXO DE CALOR ÀS 3 HORAS DE ENSAIO
 (Daré, Targa e Isa, 2005)

Tempo(min)	Taxa de transferência de calor, q em W					
	Sem sub	Sub 1	Sub 2	Sub 3	Sub 4	Sub 5
360	40,67	16,66	19,86	27,44	27,38	30,23

Verifica-se, pois, que ao fim das 3 horas de ensaio, a subcobertura 1 provoca, face ao modelo de referência, um abaixamento da transferência de calor de 59%, enquanto a subcobertura 5 provoca somente um abaixamento de 25,7%. Comparando diretamente as subcoberturas 1 e 5 conclui-se que a primeira é responsável por um fluxo de calor 45% menor do que a segunda, sendo pois mais uma evidência da vantagem do uso destes isolamentos térmicos que integram folhas de alumínio. Deste estudo ficou evidente a vantagem em existirem duas superfícies de baixa emissividade em relação a uma só, sendo claro que neste estudo não se teve em conta a influência da acumulação de poeira, que com o tempo inevitavelmente acontece na superfície superior. A explicação das vantagens do uso de duas superfícies de baixa emissividade é que a do lado superior atua por reflexão retornando a radiação de volta para o telhado, sendo que a reduzida quantidade que é absorvida, não é praticamente irradiada para o ambiente interior devido à baixa emissividade da superfície aluminizada inferior.

Em 2005 desenvolveu-se um estudo em que se comparou a utilização de vários tipos de soluções de aplicação de isolamentos térmicos em coberturas (Carletto, 2005), usando para tal cinco células constituídas por uma cobertura em desvão constituída por esteira horizontal e uma água de revestimento exterior tal e qual se mostra na Figura 4.9.



Figura 4.9
CÉLULAS USADAS NO ESTUDO DE CARLETTO
 (Carletto, 2005)

A célula 01 não integrou nenhum tipo de isolamento na cobertura, a 02 integrou embalagens de cartão para alimentos líquidos, os quais possuem folhas de alumínio, a 03 integrou barreira radiante, constituído por folha de alumínio, a 04 integrou lã de rocha com espessura de 5 cm e a 05 é onde estava instalada a central de recolha de dados. A lã de rocha e as embalagens de cartão foram colocadas sobre a laje de esteira e o isolamento constituído por folha de alumínio foi colocado na vertente. Na Figura 4.10 apresenta-se os resultados das temperaturas de bolbo seco medidas a 1,10 metros do piso de cada célula, para as quatro situações ensaiadas e para o dia representativo considerado.

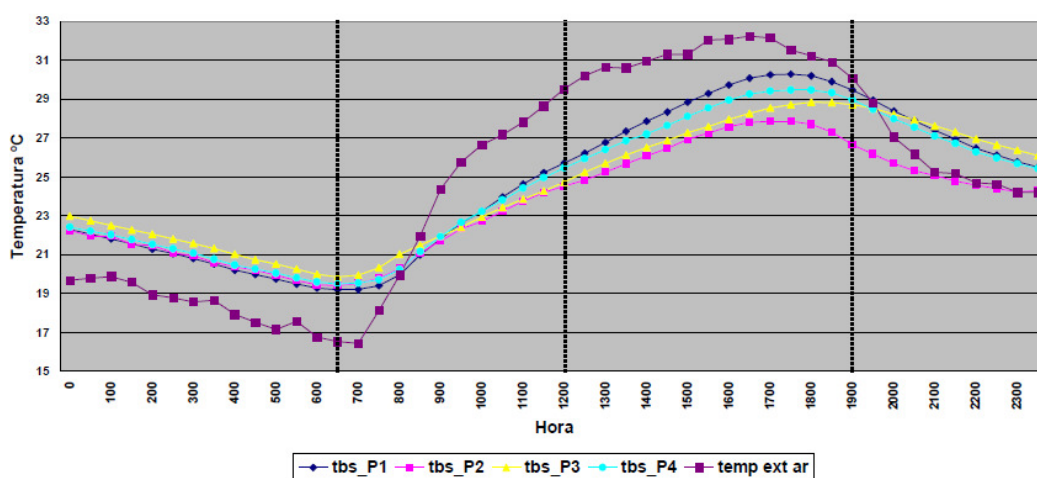


Figura 4.10
EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS DE BOLBO SECO NUM DIA REPRESENTATIVO
(Carletto, 2005)

Da análise destes resultados, Carletto (2005) concluiu que para as condições de ensaio, os isolamentos térmicos que atuam por reflexão e baixa emissividade da radiação apresentam melhor comportamento que os convencionais como a lã de rocha. No respeitante à comparação entre os resultados das células 02 e 03, o autor concluiu que as embalagens cartonadas para alimentos líquidos têm melhor comportamento do que a simples folha de alumínio, pois além daquelas atuarem em relação à transferência de calor por radiação, apresentam igualmente um funcionamento resistivo devido às câmaras-de-ar que incorporam.

Já no que respeita ao uso de soluções ecológicas de reaproveitamento das embalagens de cartão para alimentos líquidos, que contêm películas de alumínio, desenvolveu-se entre 2000 e 2001 um projeto designado por *forro vida longa* com o objetivo de utilizar estas embalagens para a constituição de mantas para forros ou subcoberturas bem como

para persianas, tendo, recebido, por este trabalho, o Diploma Tecnologia Social instituído pela Fundação Banco do Brasil. (Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica. [Em linha]. Disponível em <<http://www.fem.unicamp.br/~vidalong/projleite.html>>).

Antes da realização do estudo experimental, retirou-se, por envelhecimento, a película de polietileno que recobria o alumínio, tendo-se verificado que após cerca de 9 meses de exposição solar direta, sem contacto com a chuva, e devido ao envelhecimento, sobretudo provocado pela radiação ultravioleta, a camada de polietileno que recobria o alumínio foi totalmente destruída ficando este com todo o seu brilho.

Após esta fase de envelhecimento, foi realizado um ensaio comparativo em que se colocou, por debaixo de um vidro horizontal de uma sala, um dispositivo (B), constituindo uma manta produzida com as embalagens atrás referidas, com a face de alumínio voltada para cima, e por baixo desta, uma chapa de fibrocimento que funcionou como corpo de prova e em que se mediu a respetiva temperatura.

Construiu-se outro dispositivo idêntico (A) em que a única diferença é que não integrava a manta refletante, funcionando, assim este, como referência. Analisando os resultados obtidos das temperaturas nos dois corpos de prova, constatou-se, em alguns períodos, abaixamentos, de (A) para (B), de temperatura de cerca de 18°C. No respeitante à aplicação das mantas em estudo, com a função de persianas de janelas verticais, chegaram-se a reduções de 19,7°C na temperatura medida numa porta, que funcionou como corpo de prova, situada em frente da janela.

No âmbito deste estudo, simulou-se ainda uma série de situações, usando dois compartimentos cobertos com telha de fibrocimento e aquecidos por intermédio de lâmpadas de infravermelhos. Por baixo das telhas colocou-se a proteção térmica refletante que se pretendeu simular e mediram-se sucessivamente as temperaturas atingidas por baixo do material de proteção testado. As sete configurações foram: Sem qualquer proteção térmica refletante; com mantas em que o alumínio ficou voltado para cima; com mantas em que o alumínio ficou voltado para baixo; com as caixas, embalagens de cartão para alimentos líquidos, armadas; com as caixas achatadas; com proteção térmica refletante comercializada contendo película de alumínio e com

proteção térmica refletante comercializada contendo película polimérica metalizada. Dos resultados foi possível concluir o seguinte:

- No respeitante ao uso das mantas, as colocações da face de alumínio voltada para cima ou para baixo apresentam praticamente os mesmos resultados;
- O uso de mantas com película de alumínio resulta num comportamento ligeiramente melhor do que o uso de uma proteção comercial que integra uma folha de alumínio bem como do que o uso das embalagens ainda armadas, embora tenha um comportamento algo inferior a um produto comercial constituído por folhas poliméricas metalizadas;
- O pior resultado do teste foi obtido para as embalagens achatadas (E).

Em 2008 é publicado um estudo (Michels, Lamberts e Güths, 2008a), que teve como objetivo analisar o desempenho térmico de *barreiras radiantes* em coberturas, bem como a influência da porosidade e cor das respetivas telhas, sendo que para tal se determinou os fluxos de calor, as temperaturas do ar, interior e exterior e as temperaturas superficiais nas telhas e na esteira, ocorridos para cada situação. Este estudo foi realizado “in situ” numa cobertura de um edifício real situado em Florianópolis, de forma a validar a execução de ensaios laboratoriais. No que respeita às medições efetuadas na cobertura real, a técnica foi usar uma parte de uma das suas águas e dividi-la em oito setores separados verticalmente entre si por placas de polietileno, sendo que cada setor integrava um tipo diferente de solução de isolamento térmico e/ou tipo de telha (Figura 4.11).



Figura 4.11
SETORES DA COBERTURA DE UM EDIFÍCIO USADOS PARA ENSAIO
(Michels, Lamberts e Güths, 2008a)

As diferentes configurações usadas em cada setor foram as indicadas no Quadro 4.4.

Quadro 4.4

CARATERÍSTICAS DOS VÁRIOS SETORES ENSAIADOS DA COBERTURA
(Adaptado de Michels, Lamberts e Güths, 2008a)

Setor	Caraterísticas da proteção sob a telha	Caraterísticas da telha cerâmica
A (referência)	Sem proteção	Esmaltada e avermelhada
B	Folha de alumínio de cozinha	Esmaltada e avermelhada
C	Folha de plástico preto	Esmaltada e avermelhada
D	Folha comercial 1 com duas superfícies revestidas a alumínio e substrato de cartão de 0,5 mm de espessura	Esmaltada e avermelhada
E	Folha comercial 2 com uma superfície revestida a alumínio e substrato de polietileno expandido de 2 mm de espessura	Esmaltada e avermelhada
F	Manta realizada com embalagens de cartão para alimentos líquidos (uma face de alumínio e substrato de cartão e polietileno)	Esmaltada e avermelhada
G	Sem proteção	Porosa e avermelhada
H	Sem proteção	Esmaltada e pintada a branco

Foram colocados em cada setor da cobertura um fluxímetro na superfície superior do forro, para a medição do fluxo de calor que transita através do sistema, bem como dois termopares, um por baixo das telhas e outro na superfície superior do forro de forma a medir as temperaturas superficiais.

Da análise dos resultados, concluiu-se, para um dia típico de verão, que o máximo fluxo atingido para a situação de referência (A) é de $82,4 \text{ W/m}^2$ enquanto para a melhor solução, que é a D, o valor do fluxo de pico é somente de $22,5 \text{ W/m}^2$. É de realçar que a solução de proteção térmica F é algo melhor na redução dos picos de calor do que a solução E, evidenciando-se pois o interesse, mesmo face a alguns tipos comerciais de proteções térmicas à radiação, em reutilizar para estes efeitos, as embalagens de cartão para alimentos líquidos. Em relação às soluções G e H, que são soluções típicas de revestimentos refletantes, em que face à solução de referência só se alterou o tipo de telha, verificou-se a existência de uma certa diminuição do fluxo de calor. Em relação à solução G, tal redução do fluxo foi explicada por Michels, Lamberts e Güths (2008a) pelo facto que a telha sendo porosa provoca que parte da energia da radiação solar é gasta na evaporação da água que penetrou para o interior da telha, decorrente da condensação do vapor de água na superfície das telhas, situação que frequentemente acontece durante a noite. Já no respeitante à solução H a diminuição do fluxo de calor deveu-se ao facto que sendo pintada a branco ($\alpha = 0,2$) a telha absorve menos radiação

solar do que a telha corrente de cor avermelhada ($\alpha = 0,8$). Verificou-se igualmente que em período noturno o uso de *barreiras radiantes* reduz as perdas de calor que se processam através da esteira mas a alteração somente do tipo de telha, soluções G e H, incrementam esse mesmo fluxo em relação à solução de referência A.

Igualmente foi realizado o mesmo ensaio “in situ” mas para um dia de Outono, com pouca radiação solar e bastante nebulosidade, tendo-se verificado que neste dia o telhado só perdeu calor, sendo que a presença das *barreiras radiantes* contribuíram para diminuir o respetivo valor do fluxo, sendo que a solução D foi a mais eficiente nesse desiderato.

Em termos de eficiência verificou-se que a solução D implicou uma redução do fluxo de calor em 70% num dia típico de verão e de 63% num dia típico de Outono. Quanto à solução E esta proporcionou nos dois dias uma redução de somente 36% mostrando que sendo uma solução comercializada no Brasil não será a melhor, sugerindo-se pois que é necessário implementar normas Brasileiras relativamente ao fabrico destas proteções de modo a que estas possuam uma eficiência maior do que certas que existem no mercado. Verificou-se que a solução F teve no dia típico de verão uma eficiência maior em 8% do que a solução E.

Em relação às temperaturas superficiais verificou-se que no respeitante às temperaturas de pico atingidas na superfície inferior das telhas as soluções com barreira radiante (B a F) implicaram um aumento em relação à temperatura na solução de referência (A), sendo que a solução D foi a que proporcionou uma temperatura mais elevada, nomeadamente cerca de mais 4,5°C. Tal deveu-se ao facto que as *barreiras radiantes* refletem o calor para as telhas. No respeitante à temperatura de pico na superfície superior da esteira verificou-se que em todas as soluções existiu abaixamento do valor em relação à solução de referência A, sendo que a solução mais eficiente foi a solução D. Em relação ao dia de Outono não se verificaram alterações significativas nas temperaturas superficiais pela adoção das várias soluções, sendo relevante referir que a temperatura da superfície superior do teto foi sempre maior do que a inferior das telhas. No respeitante à comparação dos resultados “in situ” com os do laboratório verificou-se que as eficiências das várias soluções são muito próximas, sendo que, e para

exemplificar, a respeitante ao dia típico de verão, e para a solução D, variou de uma redução do fluxo de calor de 72% medida “in situ” para 67% medida em laboratório.

Ainda em 2008 é publicado um estudo (Michels, Lamberts e Güths, 2008b), que teve como objetivo o desenvolvimento de um ensaio laboratorial que pudesse caraterizar o desempenho das *barreiras radiantes*, pois foi verificado que no Brasil estas soluções de isolamento térmico são comercializadas muitas vezes sem o devido conhecimento das suas caraterísticas, sendo que vários fabricantes atribuem valores da redução do fluxo de calor devido à transferência por radiação mas somente tendo em conta os valores das emissividades das superfícies refletantes, sendo que no caso do uso do alumínio polido esta redução assim calculada é exagerada, rondando os 90%.

O ensaio laboratorial proposto contempla a determinação do fluxo de calor e das temperaturas superficiais resultantes da aplicação de vários tipos de *barreiras radiantes*. Na Figura 4.12 apresenta-se um corte do equipamento de ensaio, sendo que a camada 1 representa a cobertura e a camada 2 a esteira horizontal. Todas as superfícies foram pintadas a preto resultando uma emissividade de 0,95.

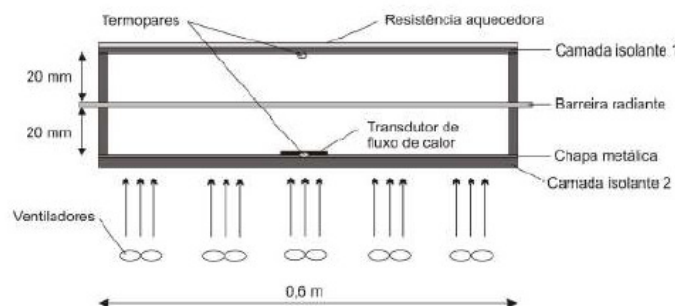


Figura 4.12
DISPOSITIVO DE ENSAIO DO COMPORTAMENTO DE BARRERIAS RADIANTES
(Michels, Lamberts e Güths, 2008b)

Este ensaio foi realizado em duas modalidades diferentes. A primeira consistiu em manter a diferença de temperatura entre a cobertura e a esteira e a segunda consistiu em manter a potência de aquecimento, proporcionando tal que a potência dissipada pela cobertura fosse constante, simulando assim a radiação solar. Neste estudo foram ensaiadas as mesmas soluções A a F de proteção sob a telha do estudo anterior dos mesmos autores mais uma solução G que consistiu no uso de placas de poliestireno expandido com 1 cm de espessura. Para estes vários casos foram calculadas as resistências térmicas relativas à convecção, radiação e condução de todas as partes

envolvidas, as diferenças de temperatura e os fluxos de calor tanto para a modalidade 1 como para a 2 do ensaio. Também se compararam os resultados experimentais com os resultados de simulação numérica baseada em modelos teóricos de trocas de calor entre duas placas paralelas e infinitas, ora para diferenças de temperatura constante, ora para potência dissipada constante (Güths e Paghi *cit. in* Michels, Lamberts e Güths, 2008b).

No respeitante aos resultados de temperaturas e fluxos de calor apresenta-se no Quadro 4.5 os respeitantes ao modelo 1 de ensaio em que a diferença de temperatura entre a cobertura e a esteira foi mantida igual a 20°C.

Quadro 4.5
RESULTADOS DA EFICIÊNCIA DAS SOLUÇÕES DE ISOLAMENTO PARA DIFERENÇA DE
TEMPERATURA CONSTANTE
(Michels, Lamberts e Güths, 2008b)

Configuração	Fluxo de calor (W/m ²)	Diferença de temperatura (°C)	Eficiência (%)	Eficiência pelo modelo teórico (%)
A	95,2	20,3	-	-
B	10,7	20,7	89	86
C	51,2	20,5	46	47
D	11,6	20,2	88	89
E	34,3	20,1	64	62
F	25,3	20,1	73	72
G	33,9	20,3	64	67

Já no Quadro 4.6 apresenta-se os mesmos resultados mas para o modelo 2 de ensaio em que se manteve uma potência dissipada constante igual a 235 W/m².

Quadro 4.6
RESULTADOS DA EFICIÊNCIA DAS SOLUÇÕES DE ISOLAMENTO PARA POTÊNCIA
DISSIPADA CONSTANTE
(Michels, Lamberts e Güths, 2008b)

Configuração	Fluxo de calor (W/m ²)	Diferença de temperatura (°C)	Eficiência (%)	Eficiência pelo modelo teórico (%)
A	57,3	8,4	-	-
B	11,2	20,2	79	80
C	41,6	14	27	33
D	16,5	18,2	71	74
E	36,4	12,7	36	41
F	30,6	15,6	46	51
G	27,8	16,8	51	51

Verifica-se pois que no caso do ensaio a temperatura constante, as soluções B, D e F conseguem proporcionar eficiências superiores à solução G do uso de poliestireno expandido com 1 cm de espessura. No caso do ensaio a potência dissipada constante, só

as soluções B e D conseguem ser mais eficientes que a G. No que respeita à comparação entre o modelo experimental e o modelo teórico verifica-se uma proximidade elevada dos valores da eficiência na redução do fluxo. Evidencia-se, ainda, que as eficiências do ensaio a potência constante são algo inferiores às obtidas para temperatura constante.

Em 2011 foi concluído um estudo (Cavalcanti, 2011) em que foram usadas chapas de aço inox polido, nomeadamente três superfícies de aço inox espaçadas entre si, ora com ar, ora com vácuo, ora com lã de vidro, como forma de reduzir a transferência de calor entre espaços climatizados. Os metais polidos são materiais que por excelência se comportam adequadamente como barreiras à transmissão de calor por radiação. O modelo experimental usado por Cavalcanti (2001) é constituído por três chapas de aço inox 430 polidas de ambos os lados e espaçadas entre si de 2,5 cm. Foram usados 6 termopares tipo K (um em cada superfície de chapa). A fonte de calor usada foi a proveniente de 4 lâmpadas de 200 W cada. A temperatura ambiente de ensaio foi de 25°C. Com este sistema ensaiaram-se três configurações. Na primeira configuração o espaçamento entre as lâminas foi realizado com ar. Numa segunda configuração aplicou-se vácuo entre as lâminas. Finalmente, na 3ª configuração, colocou-se lã de vidro entre as placas extremas, retirando-se a placa central. No respeitante à medição da temperatura superficial nas chapas com ar entre si, após o estabelecimento do regime permanente, apresenta-se na Figura 4.13 os respetivos resultados.

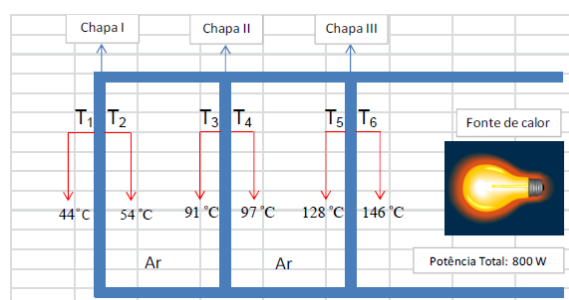


Figura 4.13
TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS CHAPAS NA SITUAÇÃO INTEGRANDO CAIXAS DE AR
(Cavalcanti, 2011)

Verificou-se que na caixa de ar, do lado da fonte de calor, a diferença de temperatura entre as superfícies que a limitam foi de 31°C e na caixa de ar mais afastada foi de 37°C. Verificou-se, ainda, que a diferença de temperatura das superfícies da chapa intermédia mantêm-se praticamente constantes ao longo do tempo, o mesmo não se passando com as outras duas em que essa diferença de temperatura vai aumentando com o tempo até se

atingir o regime permanente. Já no que respeita à medição da temperatura superficial nas chapas com vácuo entre si, e após o estabelecimento do regime permanente, apresenta-se na Figura 4.14 os respectivos resultados.

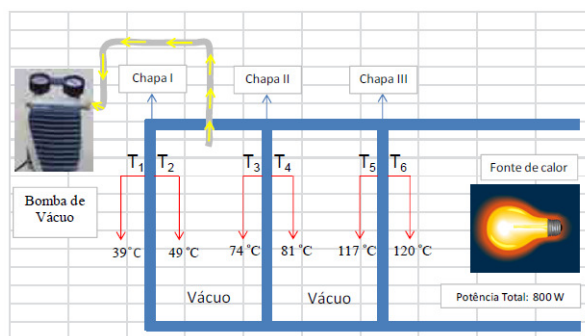


Figura 4.14

TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS CHAPAS NA SITUAÇÃO INTEGRANDO VÁCUO
(Cavalcanti, 2011)

Verificou-se que na caixa de vácuo, do lado da fonte de calor, a diferença de temperatura entre as superfícies que a limitam foi de 25°C e na caixa de vácuo mais afastada foi de 36°C, sendo que a temperatura atingida na superfície mais afastada da fonte de calor foi de 39°C, ou seja menos 5°C do que a situação com caixa de ar, evidenciando-se aqui a vantagem do vácuo face ao ar.

Finalmente e quanto à medição da temperatura superficial das chapas com aplicação de lâ de vidro entre elas, e após o estabelecimento do regime permanente, apresenta-se na Figura 4.15 os respectivos resultados.

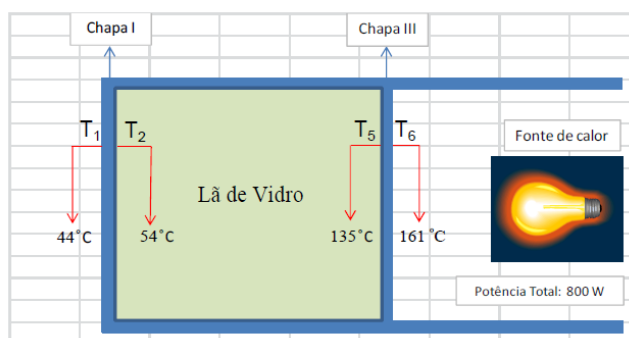


Figura 4.15

TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS CHAPAS NA SITUAÇÃO INTEGRANDO LÃ DE VIDRO
(Cavalcanti, 2011)

Analisando os resultados, verificou-se que a temperatura na chapa mais afastada da fonte de calor é igualmente superior em 5°C relativamente à situação com vácuo.

Comparando o valor das temperaturas nas superfícies externas, 6 e 1, verificou-se que no sistema com lã de vidro, conseguiu-se obter, em regime permanente, um abaixamento da superfície 6 para a 1 superior em 12% à situação com caixas de ar e de cerca de 30% em relação à situação com vácuo.

Ainda no mesmo estudo, executou-se uma comparação dos fluxos de calor nas três configurações, verificando-se que, com a aplicação da lã de vidro, o fluxo teve um valor de 6,31 W. Com ar entre as chapas de inox polido, o fluxo foi de 5,53 W e com vácuo o fluxo tomou o valor de 2,52 W, ou seja menos 60% do que a situação com aplicação da lã de vidro. Entre a aplicação de ar e de vácuo entre as chapas existe para o último uma diminuição do fluxo de calor de cerca de 55% em relação ao primeiro.

Da análise destes resultados resulta que para as condições de ensaio empreendidas por Cavalcanti (2011) os isolamentos térmicos refletantes têm melhor comportamento do que os isolamentos resistivos.

No entanto, o autor desta tese de doutoramento, acha importante alertar que Cavalcanti (2011) não analisou o comportamento das várias configurações para temperaturas absolutas mais baixas, usando para tal potências inferiores das lâmpadas, pois os 800 W utilizados implicam temperaturas absolutas superficiais da chapa de inox mais próxima da fonte de calor superiores a 120°C, situação que é algo exagerada em termos de simulação de temperaturas superficiais correntes dos materiais de construção expostos à radiação solar.

Para sustentar esta análise, do autor desta tese de doutoramento, mostra-se na Figura 4.16 uma imagem de termografia, obtida pelo autor, relativa a uma cobertura em alumínio na cidade do Porto às 13h de um dia substancialmente quente de Agosto, em que se pode constatar que a temperatura máxima atingida nas superfícies foi de 47,7°C.



Figura 4.16
IMAGEM DE TERMOGRAFIA DE UMA COBERTURA EM ALUMÍNIO

Sobre este assunto da potência das lâmpadas de ensaio refere-se ainda que o estudo executado por Daré, Targa e Isa (2005) utilizou somente duas lâmpadas incandescentes de 150W. Assim, visto nos estudos de Cavalcanti (2011) os valores de temperatura atingidos do lado da fonte de calor serem bem superiores ao que poderia acontecer num elemento de construção corrente, tal situação potencia muito as trocas de calor por radiação, que de acordo com a lei de Stefan-Boltzman são proporcionais à 4ª potência da temperatura superficial. Ainda sobre este assunto, refere-se que Medina et al. (1992) obtiveram temperaturas superficiais máximas de 68°C para um telhado.

Em 2014 foi realizado um estudo sobre análise térmica de coberturas com camadas de isolamento térmico resistivo e com revestimentos refletantes tanto em climas subtropicais como equatoriais em regiões do Brasil (Filho e Santos, 2014). O problema base de partida para este estudo foi a constatação dos autores de que em algumas cidades Brasileiras e em dias muito quente, estas apresentam uma temperatura média em 12°C superior às áreas periféricas, consubstanciando-se tal no efeito das ilhas urbanas de calor, sendo que são as temperaturas dos pavimentos das cidades e das coberturas dos edifícios os principais responsáveis pelo referido efeito. Também outro objetivo deste estudo foi a de verificar que soluções de isolamento de coberturas poderiam proporcionar maior poupança na energia utilizada para arrefecimento ambiente dos edifícios. Para este estudo foi usado um modelo matemático de transferência de calor, de modo a ser possível para várias configurações calcular a temperatura superficial exterior da cobertura e o fluxo de calor através dela. Com este estudo chegou-se às seguintes conclusões:

- Coberturas com camadas de isolamento térmico resistivo (5 cm de poliuretano) reduzem o fluxo de calor que chega ao ambiente interior dos edifícios e consequentemente diminui o consumo de energia para arrefecimento, no entanto e ao mesmo tempo provoca o aumento da temperatura superficial exterior da cobertura, provocando tal um aumento da temperatura do ar que rodeia essas coberturas e como tal contribuindo fortemente para o efeito das ilhas urbanas de calor;
- Nas cidades de clima equatorial, como Manaus, para efeitos da redução da energia para arrefecimento ambiente é benéfico o uso de camadas de isolamento resistivo, sendo que o problema da contribuição para o efeito das ilhas urbanas de calor, pode ser fortemente reduzido pela utilização de revestimentos refletantes da radiação solar na superfície exterior da cobertura. Estes revestimentos reduzem igualmente o problema do choque térmico nas coberturas devido às variações da sua temperatura superficial entre o dia e a noite;
- Já nas regiões de clima subtropical, como Curitiba, a aplicação nas coberturas de revestimentos refletantes, sem utilização de camadas de isolamento térmico resistivo é a melhor solução tanto para a redução do consumo de energia para arrefecimento ambiente como para diminuir a formação do efeito das ilhas urbanas de calor.

Santos e Mendes (2015) realizaram um estudo, vocacionado para locais com climas quentes e húmidos, sobre o desempenho higrotérmico, de isolamentos refletantes aplicados em coberturas, como o da Figura 4.17.



Figura 4.17

ISOLAMENTO REFLETANTE ANTES DE SE APLICAR O REVESTIMENTO DA COBERTURA
(Santos e Mendes, 2015)

Santos e Mendes (2015) referem que este tipo de isolamentos é mais eficiente em climas quentes, especialmente se as condutas dos sistemas de arrefecimento passam no desvão

de cobertura, sendo que para climas frios é mais benéfico colocar isolamentos resistentes com espessura significativa.

Para este estudo usaram um modelo numérico bidimensional para o transporte de calor, ar e humidade, e consideraram dois cenários: o primeiro integrou, por baixo da cobertura isolamento refletante, com revestimento superior em folha de alumínio polido ($\epsilon = 0,1$), sendo que entre este e o revestimento da cobertura deixou-se um espaço de ar com 2,5 cm de espessura. No segundo cenário retirou-se o isolamento refletante. Deste estudo chegaram-se às seguintes conclusões:

- Os fluxos máximos de calor através da cobertura foram reduzidos em 40% com a aplicação do isolamento refletante por baixo da cobertura;
- Quando o isolamento refletante é usado, o fluxo de calor latente é desprezável devido à impermeabilidade do alumínio. Quando o isolamento é removido um adicional ganho de calor de 10% é observado devido ao transporte da massa de ar e aos mecanismos da mudança de fase;
- Em coberturas que integram isolamentos refletantes existiram reduções significativas, de 60%, no fluxo de calor total, quando se passa de um revestimento da cobertura de cor escura para clara;
- Coberturas sem isolamento refletante e de cor escura causam uma enorme carga térmica no interior dos edifícios;
- É de primordial importância usar isolamento refletante para incrementar a poupança de energia e para implementar estratégias de arrefecimento passivo em climas quentes e mesmo moderados.

Ainda em 2015 foi publicado um estudo sobre a degradação, com o passar do tempo, das propriedades refletantes de pinturas acrílicas aplicadas como revestimentos de coberturas (Dornelles e al., 2015). Para tal foram submetidas durante 18 meses à ação ambiental (radiação solar, temperatura, chuva, pó, sujidades várias, entre outros) 20 tipos de amostras destes revestimentos.

Os resultados indicaram uma redução das propriedades refletantes desses revestimentos, sobretudo os de cor clara e em especial de textura rugosa, em que chegaram a diferenças de cerca de 28%. Assim, do estudo concluiu-se que existe a necessidade de desenvolvimento de revestimentos capazes de manter as suas características refletantes,

de forma a que não existam, com o tempo, incrementos de ganhos de calor para o interior dos edifícios, incluiu-se aqui a necessidade de reduzir os intervalos de operações periódicas de manutenção nestas coberturas.

Realça-se, por fim, que no Brasil, existem normas, publicadas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas. [Em linha]. Disponível em <<http://www.abntcatalogo.com.br/>> , que abordam o assunto dos isolamentos térmicos refletantes, nomeadamente a NBR 15567:2008 intitulada “Folhas de alumínio e suas ligas - Barreiras de radiação térmica para uso em edificações – Requisitos”, a NBR 15636:2008 intitulada “Folhas de alumínio e suas ligas - Barreiras de radiação térmica para uso em edificações – Instalação” e a NBR 15446:2006 intitulada “Painéis de chapas sólidas de alumínio e painéis de material composto de alumínio utilizados em fachadas e revestimentos arquitetónicos - Requisitos”.

4.4 ESTUDOS REALIZADOS NOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA

Em 1990 foi desenvolvido um estudo no Oak Ridge National Laboratory, em Springfield (Desjarlais e Tye *cit. in* Matias, 2001) com o objetivo de, com recurso ao método de ensaio normalizado da caixa quente com guarda, avaliar o desempenho térmico de vários tipos de *barreiras radiantes* constituídas por uma única folha ou por três, em que esta última situação delimita dois espaços de ar fechados. Os materiais de isolamento foram fixos a uma estrutura, ora de madeira, ora de XPS, sendo assim constituído cada provete de ensaio.

Para se comparar estas soluções de proteção térmica com uma convencional, resistiva, foi ainda ensaiado um provete constituído por lã de vidro. Os provetes ensaiados foram submetidos, ora a um fluxo de calor ascendente, ora a um descendente, de forma a simular-se a aplicação em coberturas. Os resultados deste estudo apresentam-se no Quadro 4.7.

Quadro 4.7

RESISTÊNCIA TÉRMICA EFETIVA DOS PROVETES ENSAIADOS EM CAIXA QUENTE COM GUARDA

(Desjarlais e Tye *cit. in* Matias, 2001)

Proвете constituída por	Sentido do fluxo	Material constituínte da estrutura	Resistência térmica efectiva ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
1 folha reflectante	↓	XPS	1,44
		Madeira	1,33
	↑	XPS	0,36
		Madeira	0,30
3 folhas reflectantes	↓	XPS	2,95
		Madeira	3,00
Lã de vidro	↑	XPS	2,85
		Madeira	3,04

Da análise dos resultados tiraram-se as seguintes conclusões:

- A resistência térmica relativa ao fluxo descendente foi substancialmente maior do que a relativa ao fluxo ascendente;
- A resistência térmica, em fluxo descendente, relativa ao provete constituído por três folhas refletantes é sensivelmente o dobro da obtida pelo provete com uma só folha;
- A resistência térmica, em fluxo ascendente, relativa ao provete de lã de vidro é substancialmente o dobro à obtida com o provete constituído por uma folha refletante.

Dos fatores que influenciam muito os resultados dos ensaios são as condições de ventilação existentes. Deste modo, em 1987 Katimula *cit. in* Matias (2001) publicou na ASHRAE um estudo em que através de um dispositivo de laboratório, analisou a influência da ventilação no desempenho térmico dos desvãos de cobertura isolados termicamente na laje de esteira, com e sem a aplicação de uma folha de alumínio refletante sobre o isolamento térmico resistivo.

Da análise dos resultados, Matias (2001), para as condições de ensaio, tirou as seguintes conclusões:

- A existência de uma folha de alumínio a revestir o isolamento resistivo proporcionou a redução para sensivelmente metade do fluxo de calor que atravessa a esteira;
- A ventilação do desvão permite a redução do fluxo de calor na situação do uso ou não da folha de alumínio;
- A aplicação da folha de alumínio sem ventilação, permite uma maior redução do fluxo de calor, do que apenas pela aplicação do isolante resistivo, mesmo com o espaço ventilado.

Um outro fator determinante no desempenho das *barreiras radiantes* é a deposição de poeira e outras sujidades nas superfícies de baixa emissividade. Para se compreender esta influência foi realizado em 1989 um estudo (Cook e Yarbrough *citin* Matias, 2001), também publicado na ASHRAE, em que se utilizaram várias tipologias de poeiras que se depositaram sucessivamente por cima de uma superfície refletante com uma emissividade (ϵ) total de 0,03. Os resultados apontaram para uma variação brusca e assintótica da emissividade para um determinado valor que variou com o tipo de poeira e que se situou entre 0,68 e 0,85.

Integrado neste estudo foram medidos “in situ” os valores das emissividades de superfícies refletantes aplicadas em esteiras horizontais de oito edifícios em Chicago. As proteções refletantes desses edifícios após 39 a 52 meses apresentaram variações entre 0,07 e 0,42, prevendo-se que a situação seria muito mais gravosa caso o tempo de exposição fosse ainda maior. O mesmo estudo avaliou a variação de fluxo de calor resultante do aumento da emissividade da superfície refletante, tendo concluído que para as condições do ensaio uma variação de ϵ de 0,1 para 0,9 implicou um aumento de 50% no fluxo de calor.

Em 1991 foi concluído na Universidade do Texas um estudo sobre a influência do pó na emissividade das *barreiras radiantes* (Noboa, 1991), em que se distinguiu várias tipologias de acumulações e dimensões diferentes das partículas de pó, tendo-se para tal usado dois modelo matemáticos, um mais refinado e outra mais simplificado. Estes dois modelos foram comparados entre si e com medições experimentais, tendo-se obtido resultados muito próximos.

Na Figura 4.18 apresenta-se os resultados, pelo método numérico refinado, da emissividade de *barreiras radiantes* sujeitas à deposição de pó constituído por partículas com 19,8 μm , para várias densidades em g/cm^3 e acumulação em mg/cm^2 .

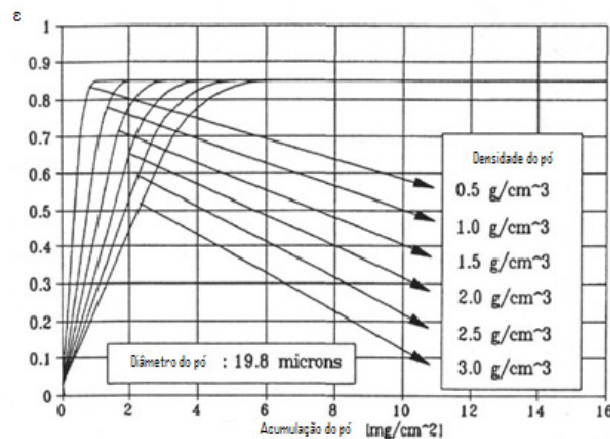


Figura 4.18
SENSIBILIDADE DA EMISSIVIDADE À DENSIDADE DO PÓ
(Adaptado de Noboa, 1991)

Verifica-se, pois, que quanto maior for a densidade do pó menor é a emissividade da barreira. Noboa (1991) explica tal resultado pelo facto que uma menor densidade de pó, cobre naturalmente uma área maior da barreira radiante. Também pelo método numérico refinado, calculou-se a variabilidade da emissividade com a dimensão das partículas, concluindo-se que diâmetros maiores apresentam menos emissividade, sendo que a razão que, para tal, foi apontada prende-se com o facto das partículas maiores apresentarem mais espaços vazios entre si e como tal mais área livre de proteção refletante.

Em 1992 foi realizado um estudo na Universidade do Texas em que se empreenderam ensaios em duas células com dimensão em planta de 3,66 m x 3,66 m, com o objetivo de se saber qual a diferença de comportamento das coberturas integrando desvãos com e sem o uso de *barreiras radiantes* e para várias taxas de renovação do ar (Medina et al., 1992). Ambas as células possuíam por cima da laje de esteira isolamento térmico de lã de vidro. Uma das células foi posteriormente submetida à aplicação sucessiva de *barreiras radiantes*, ora tanto na esteira, por cima da lã de vidro, com a superfície de baixa emissividade orientada para o desvão, como ora imediatamente por baixo das vertentes, comparando-se, depois, com o comportamento da outra célula de ensaio que funcionou como teste de controlo. Foram igualmente, ambas as células, submetidas a diferentes taxas de ventilação no desvão de forma a compreender-se a influência da renovação do ar no desempenho térmico das *barreiras radiantes*. Ambas as células foram equipadas com unidades de refrigeração e cerca de 120 sensores calibrados, nomeadamente termopares tipo T, medidores de fluxo de calor de superfície, medidores

do fluxo de água do sistema de refrigeração, higrômetros, piranómetro, entre outros. Foi também utilizado um emissómetro para medir o valor da emissividade das superfícies.

Inicialmente, Medina et al.(1992), realizaram uma revisão da literatura existente sobre esta temática, apresentando-se resultados da aplicação das *barreiras radiantes* com reduções de fluxo de calor através da esteira da cobertura, entre os 20 e os 63% e com poupança na energia despendida com o arrefecimento entre 8 e 20%. O estudo que citaram como sendo o primeiro que integrou ensaios que testaram em conjunto o efeito da aplicação de *barreiras radiantes* e da ventilação do desvão das coberturas foi o de Joy em 1958 *cit. in* Medina et al. (1992). Neste estudo foram usadas duas células, uma com cobertura horizontal e outra com cobertura inclinada com desvão, sendo que em ambas se colocaram numa segunda fase *barreiras radiantes*. No respeitante à cobertura com desvão, concluiu-se que esta com barreira radiante reduziu em 28% o fluxo de calor que passava no sentido descendente através da esteira e que esse valor não se alterava com a variação das taxas de renovação de ar nesse desvão.

Em 1988, Hall *cit. in* Medina et al. (1992), estudou vários efeitos que influenciam o comportamento das *barreiras radiantes*, como é exemplo a deposição de poeira e a ventilação do desvão. Em relação à última testou, em células localizadas no exterior, o uso de sistemas de ventilação natural de coberturas, nomeadamente o uso de sistemas em que a entrada do ar se dá nos beirais e a saída nos cumes, bem como sistemas em que se integraram grelhas de ventilação nas empenas do desvão. Na situação do uso das *barreiras radiantes* imediatamente por baixo da estrutura da cobertura, a redução média do fluxo de calor que passava na esteira foi de 48% para uma velocidade média do vento de 5,31 Km/h. Quando a barreira radiante foi colocada horizontalmente por cima da esteira a redução chegou aos 63%. No mesmo ano de 1988, Ober and Volckhausen *cit. in* Medina et al. (1992) realizaram ensaios também em coberturas ventiladas com os mesmos sistemas de ventilação e chegaram a valores de redução do fluxo, através da esteira, da ordem dos 20% e também em 1988, Fairey et al. *cit. in* Medina et al. (1992), desenvolveram um modelo em regime estacionário tendo concluído que para valores de renovação do ar dos desvãos de cobertura superiores a valores entre 1,3 a 1,8 l/(s.m²) tal não implicou melhoria de funcionamento da barreira radiante.

O ensaio experimental de Medina et al. (1992), foi realizado de 25 de Julho a 20 de Outubro de 1990, tendo testado na célula em que a barreira radiante foi aplicada por cima da lã de vidro, o comportamento do sistema para cinco valores diferentes de taxas de ventilação (0; 0,6; 1,3; 2,5 e 5,1 l/(s.m² de esteira)). Os dados que se recolheram mostraram claramente a vantagem do uso das *barreiras radiantes* por cima de um isolamento resistivo como a lã de vidro. Pela análise dos resultados obtidos dos fluxos de calor nas duas células, no período de 28 e 29 de Julho de 1990, e para um caudal de ventilação de 5,1 l/(s.m²) de esteira, sendo a solução de colocação de barreira radiante sobre a esteira (designada por HRB), verificou-se que ao colocar a barreira radiante na face superior da camada de lã de vidro, conseguiu-se reduzir substancialmente o fluxo de calor que passa na esteira, em especial nos períodos diurnos do meio da tarde. A integração dos valores da redução diária do fluxo de calor na situação do uso da barreira radiante deu como resultado um valor de 29,8%, que chegou a 40,6% durante a hora mais quente do referido período.

Os dados mostraram que a redução do fluxo de calor através da esteira, acontece mesmo em períodos em que não existe qualquer radiação solar (período noturno). O calor armazenado na estrutura do telhado, bem como a condensação do vapor nas superfícies do desvão, que provoca a libertação do calor latente, cria um fluxo de calor positivo que entra na casa a partir da esteira, sendo que a barreira radiante reduz também esse mesmo fluxo.

Na Figura 4.19 representa-se, em função da diferença de temperatura exterior/interior e para a mesma taxa de ventilação do desvão de 5,1 l/(s.m²), os valores dos fluxos de calor(q) através da esteira bem como a percentagem de redução de fluxo (Δq) de calor entre a situação com e sem barreira radiante. Verifica-se, pois, como seria de esperar, que quanto maior é a diferença de temperatura, maior são os fluxos de calor e a diferença entre eles, o que implica que a taxa de redução do fluxo é também superior, chegando-se a valores de redução de mais de 30% para diferença de temperatura de 16°C.

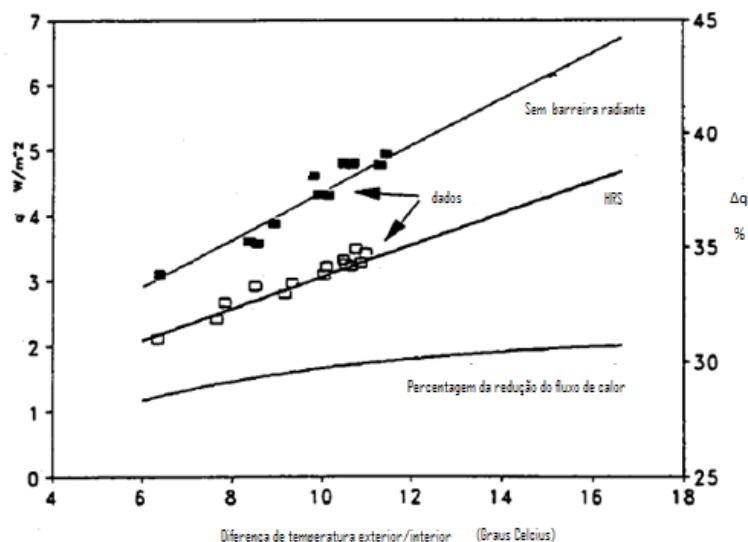


Figura 4.19
 REDUÇÃO DO FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DA ESTEIRA EM FUNÇÃO DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA EXTERIOR/INTERIOR
 (Adaptado de Medina et al., 1992)

Para evidenciar a relação da redução do fluxo de calor que atravessa a esteira com a diferença de temperatura exterior/interior e com a taxa de ventilação, realizaram-se estudos de análise de sensibilidade que permitiram concluir que com aplicação das *barreiras radiantes* na esteira (HBR), para uma diferença de temperatura interior/exterior de 8°C e para taxas de ventilação do desvão mais elevadas do que 1,3 l/(s.m² de esteira), a redução do fluxo de calor através do pavimento do desvão mantém-se praticamente constante, ou seja, para estas situações e nas condições de ensaio, o incremento de ventilação não produz benefícios em termos da redução do fluxo de calor. Para uma diferença de temperatura exterior/interior inferior a 8°C, a componente transferência de calor por radiação ainda não é dominante, sendo, assim, a redução do fluxo de calor através da esteira, atinge valores superiores para taxas de ventilação mais elevadas. Já para diferenças de temperatura exterior/interior superiores a 8°C, a transferência de calor por radiação que provém da cobertura e das paredes de empena do desvão toma preponderância sobre a convecção e a condução, resultando que o aumento da taxa de ventilação tem agora um impacto de menor redução do fluxo de calor. Em termos de valores médios diários ao longo dos extensos períodos considerados, concluiu-se, para as condições de ensaio, que a redução de fluxo com o uso de *barreiras radiantes* na horizontal (HRB) por cima da lã de vidro foi incrementada com o aumento da ventilação do desvão de cobertura até valores desta de 1,3 l/(s.m² de esteira). Para valores sucessivamente superiores de taxas de ventilação a redução de fluxo de calor,

nas condições de ensaio, manteve-se sensivelmente constante a 28% em relação à situação de só aplicação de lã de vidro. Também se concluiu que, em especial, para taxas de ventilação inferiores a $1,3 \text{ l}/(\text{s.m}^2 \text{ de esteira})$, à medida que se incrementa a taxa de renovação de ar no desvão a redução de fluxo de calor foi sucessivamente menor, ou seja, o uso de *barreiras radiantes* por cima da lã de vidro foi mais eficiente quando o desvão de cobertura não é ventilado, pois neste caso as trocas de calor por convecção são desprezáveis.

Medina et al. (1992), concluíram, ainda, quanto à redução do gasto de energia com o arrefecimento das células de ensaio, que para taxas de ventilação mais elevadas essa redução permanece praticamente constante. Alertou-se, ainda, que numa situação real “in situ” essas reduções do gasto de energia deverão ser superiores pois o efeito das *barreiras radiantes* a este nível depende da razão entre a área da esteira e a área das paredes exteriores, sendo que normalmente em casos reais tal razão, sendo superior, implica igualmente uma poupança de energia mais elevada.

Em 1996 foi empreendido um estudo realizado também no Texas (Winiarski e O’Neal, 1996) que consistiu no desenvolvimento de um modelo matemático para quantificar as transferências de calor em desvãos de cobertura em que se aplicaram *barreiras radiantes*. O referido modelo foi comparado com os resultados obtidos em duas células de ensaio, em que foram testadas diversas situações, nomeadamente sem barreira radiante e com barreira radiante nas vertentes. A barreira radiante possui uma só folha com emissividade total igual a 0,04, sendo perfurada em 2% da área, de forma a ser possível o vapor de água transitar por ela, resultando, assim, uma emissividade final do material no valor de 0,06. Deste estudo pode concluir-se que a aplicação da barreira radiante nas vertentes da cobertura permitiu, face à situação sem qualquer proteção térmica, uma redução da energia que a atravessa entre 29 e 38%. Já no que diz respeito à comparação entre os resultados da energia, resultantes da integração dos fluxos de calor, do modelo matemático e dos ensaios, verifica-se que os valores obtidos no primeiro são inferiores aos do segundo mas no que respeita à percentagem de redução, pela inclusão da barreira radiante, a situação inverte-se.

Em 2000, na Universidade do Texas, foi concluído um estudo cujo objetivo foi a análise do comportamento de *barreiras radiantes* em coberturas com desvão. Medina (2000a) refere que duas das possibilidades de instalação mais frequentes das *barreiras radiantes* são a horizontal, por cima da esteira (HRB) com a face de baixa emissividade, caso só possua uma, voltada para cima ou nas vertentes por baixo da estrutura de suporte (treliças) do telhado (TRB) com a face de baixa emissividade, caso também só possua uma, voltada para baixo.

Medina (2000a) sustenta que como a configuração HRB está muito sujeita à acumulação do pó e outras partículas, bem como em geral o desvão é usado para motivos de arrumos, esta configuração é inadequada, daí Medina (2000a) dar importância acrescida, neste trabalho, ao estudo da configuração TRB. O autor desta tese de doutoramento, evidencia que podem acrescer alguns problemas na configuração HBR pelo facto de poderem passar alguns fios elétricos na esteira e que existindo contacto com as folhas de alumínio pode ser perigoso. É claro que, por outro lado, caso se utilizem materiais com uma maior resistência ao esmagamento e à perfuração, como foi o caso do usado pelo autor, pode até ser mais benéfico para a proteção da rede elétrica ao andar por cima, do que o uso da lã de rocha.

Um parâmetro muito importante que afeta o comportamento das *barreiras radiantes* é o nível de isolamento térmico que está instalado no edifício, nomeadamente no desvão da cobertura. Medina (2000a) utilizando os resultados de outros estudos anteriores que dizem respeito a sótãos expostos ao exterior com construção, geometria e ventilação similares entre si e que apresentam resultados que incluem, além das horas diurnas, as noturnas, desenvolveu uma correlação entre o nível de isolamento térmico resistivo colocado na esteira, com a redução do fluxo através desta, pela sobreposição de *barreiras radiantes*. A conclusão a que chegou é que, como seria de esperar, quanto maior for o nível de isolamento térmico com material resistivo menor é a redução do fluxo de calor que passa na esteira, devido ao uso conjunto de *barreiras radiantes*.

Cumulativamente à vertente experimental deste estudo, Medina (2000a) desenvolveu, igualmente, um modelo teórico para aplicação num programa de computador e comparou os resultados de ambos. O modelo matemático foi desenvolvido com base na

primeira Lei da conservação da energia, também conhecida por primeira Lei da Termodinâmica, e que permitiu calcular o arrefecimento instantâneo sensível e latente e as cargas de calor, baseado nas equações de balanço energético desenvolvidas para cada superfície da fronteira do sistema e para cada camada de ar do desvão. Foi depois verificado este modelo por comparação com os resultados experimentais tendo-se chegado a bons resultados, sendo que o erro acumulado foi inferior a 2%. A taxa de ventilação considerada foi de $5,1 \text{ l/(s.m}^2\text{)}$, que no caso do ensaio experimental foi assegurada pelo uso de um ventilador mecânico e foram considerados três níveis ($1,94$; $3,35$ e $5,28 \text{ m}^2\text{C/W}$) de isolamento térmico resistivo de lã de vidro por cima da esteira horizontal. As duas células foram mantidas a temperatura constante e igual entre si. A barreira radiante é perfurada em 5% da sua área apresentando uma emissividade total já ponderada de $0,0925$. Na Figura 4.20 indicam-se os resultados do fluxo de calor que atravessa a cobertura num período referente ao mês de Julho, no respeitante à aplicação da barreira radiante nas vertentes (TRB), tanto para o modelo teórico como para o experimental, no caso da aplicação na esteira de ambas as células de lã de vidro com uma resistência térmica de $1,94 \text{ m}^2\text{C/W}$.

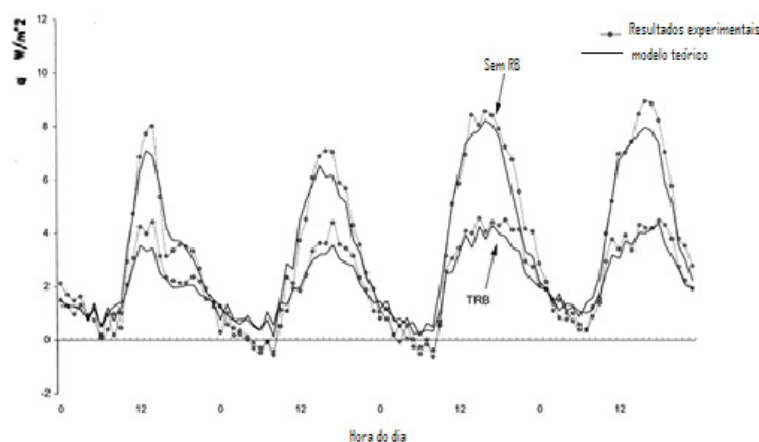


Figura 4.20
RESULTADOS DO FLUXO DE CALOR DA APLICAÇÃO TRB EM RELAÇÃO AO MODELO DE REFERÊNCIA
(Adaptado de Medina, 2000a)

Para esta situação a após análise dos resultados, Medina (2000a) concluiu que a redução de fluxo produzido pela barreira radiante é de 42%. Já por exemplo para a situação de aplicação de isolamento de lã de vidro com uma resistência térmica, maior, de $5,28 \text{ m}^2\text{C/W}$ o valor obtido da redução do fluxo de calor foi substancialmente mais baixo e

igual a 25%. Medina (2000a) chama no entanto a atenção de que a resistência térmica real da lâ de vidro é na prática inexata pois é impossível controlar com rigor a espessura da aplicação. Também explica que as maiores diferenças entre os resultados do modelo matemático e do ensaio experimental podem ser, por um lado, devido ao facto que os valores das grandezas climáticas usadas no modelo não serem medidos no local exato onde os ensaios experimentais foram realizados, e por outro, devido ao facto de que no modelo o teor da humidade da madeira foi considerado constante, quando na realidade é variável, de acordo com a humidade do ar.

Apesar da colocação de *barreiras radiantes* na esteira horizontal (HRB) não ser muito aconselhável devido à acumulação de pó, a menos que se tenha o trabalho de limpar regularmente as mesmas ou que se consiga colocar em funcionamento uma superfície de baixa emissividade na superfície inferior, sendo para tal necessário dispor de uma caixa-de-ar por baixo da barreira radiante, que, de preferência, deve ser rígida para ser possível andar por cima, Medina (2000a) executou uma comparação experimental entre a colocação da barreira nesta posição e na já focada disposição nas vertentes da cobertura (TRB).

Pela análise dos resultados Medina (2000a) concluiu que os perfis de fluxo de calor de ambas as situações são similares, embora com reduzidas vantagens para a solução HRB, situação que foi explicada com recurso ao facto das paredes de empena do desvão não serem isoladas, o que é algo prejudicial para a solução TRB. No entanto Medina (2000a) coloca a possibilidade destas diferenças serem originadas por erros de instrumentação. Também foi realçado que, apesar da redução de fluxo de calor ser idêntica nas duas situações, no respeitante à redução da temperatura do ar no interior do desvão, a solução TRB foi substancialmente mais eficiente do que a solução HRB, sendo que a temperatura superficial exterior nas telhas foi idêntica nas duas situações.

Para finalizar este estudo foi ainda realizada uma análise (Figura 4.21) da redução da quantidade de calor que passa pela esteira em cada mês do ano devido à aplicação da configuração TRB, para a mesma taxa de ventilação e para os três níveis de isolamento resistivo já referidos, usando para tal o modelo matemático. Os dados climáticos usados foram os da cidade de Austin no Texas, que apresenta um clima subtropical.

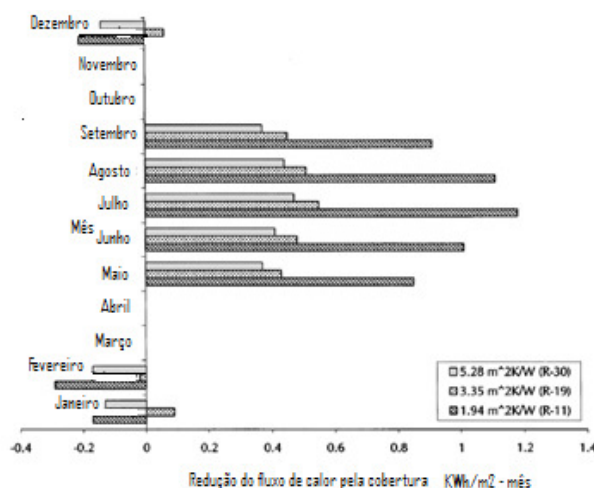


Figura 4.21
 RESULTADOS DA REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA DA APLICAÇÃO TRB PARA OS VÁRIOS MESES DO ANO
 (Adaptado de Medina, 2000a)

Verificou-se, pois, que nos meses de setembro a maio essa redução da quantidade de energia é menor com o aumento da resistência térmica do isolamento resistivo. Nos meses de transição, março, abril, outubro e novembro não existiu nenhuma influência da aplicação da barreira radiante, até porque nestes meses praticamente não é necessário aquecer ou arrefecer as casas. Já nos meses de inverno, dezembro a fevereiro, o nível intermédio de isolamento resistivo em dezembro e janeiro continua a apresentar reduções de energia embora nas outras situações tal não aconteça. Medina (2000a) explicou tal pelo facto da radiação solar no inverno ser benéfica pois reduz a energia consumida pelos equipamentos de aquecimento, sendo que as *barreiras radiantes* minoram esse ganho solar térmico pois são uma barreira à passagem da radiação, podendo, assim, acabar por originar a necessidade de maiores consumos de energia em certos climas e situações de isolamento térmico, como foi o caso.

Ainda em 2000 é apresentado um outro estudo (Medina, 2000b), complementar ao anterior, que teve por objetivo analisar, através de modelo matemático, os efeitos de alguns parâmetros que se estimavam que influenciavam o desempenho das *barreiras radiantes* em desvãos de cobertura que integravam isolamentos resistivos na laje de esteira. Os parâmetros analisados foram a absorção da radiação pelas telhas, a emissividade da barreira radiante, a taxa de ventilação do desvão de cobertura e a inclinação das vertentes do telhado. O modelo matemático foi validado através de ensaios experimentais, mais uma vez realizados em Austin no Texas, que possui um

clima húmido subtropical. Em termos de resultados concluiu-se que dos quatro parâmetros analisados só a emissividade da barreira radiante possuía efeitos de primeira ordem no comportamento do sistema. As variações do desempenho da disposição HBR com os outros três parâmetros foram mínimas e as relativas à disposição TBR já foram um pouco superiores, devido ao facto das paredes de empena do desvão não estarem isoladas. O aumento da emissividade da barreira radiante provoca uma significativa diminuição da redução do fluxo de calor que atravessa a esteira horizontal na estação de arrefecimento tanto para a disposição HBR como para a disposição TBR.

Verificou-se que se a emissividade total passar de 0,03 para 0,3, situação que pode por exemplo ocorrer com a deposição de pó e sujidades, existe uma redução para metade do valor da diminuição do fluxo de calor face ao modelo de referência. Na estação de aquecimento, nas condições de ensaio, verificou-se o contrário, pois quanto maior for a emissividade maior é o calor transferido para o interior da célula nos períodos em que existem ganhos decorrentes da radiação solar, superando estes o aumento das perdas térmicas originadas noutros períodos, nomeadamente durante a noite. Tal balanço entre ganhos e perdas proporcionou a diminuição da energia gasta com a manutenção da temperatura de conforto da célula. Na Figura 4.22 mostra-se os resultados da influência da emissividade na redução do fluxo de calor (Δq) tanto na estação de aquecimento como de arrefecimento para as duas disposições HBR e TBR, fixando-se uma taxa de ventilação do desvão em $5,1 \text{ l/(s.m}^2\text{)}$ e a colocação sobre a esteira de isolamento em lã de vidro de resistência térmica igual a $3,35 \text{ m}^2\text{K/W}$.

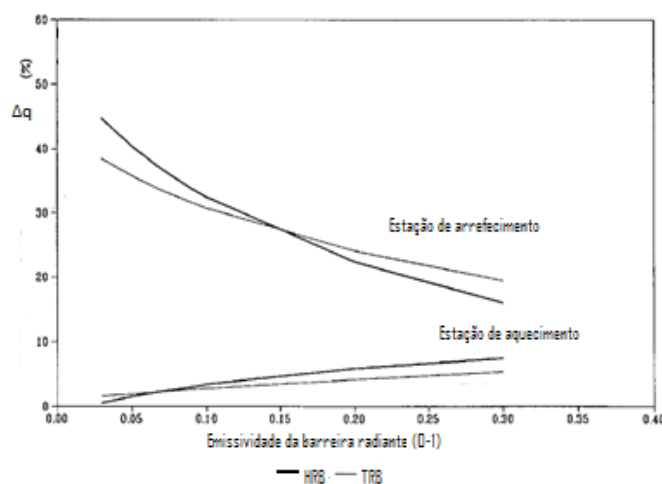


Figura 4.22
RESULTADOS DA DIMINUIÇÃO DO FLUXO DE CALOR COM APLICAÇÃO DE BARREIRAS
RADIANTES EM FUNÇÃO DA EMISSIVIDADE
 (Adaptado de Medina, 2000b)

Em 2003 foi realizado um estudo, com base num modelo matemático, que teve o objetivo de saber até que ponto o clima existente nos Estados Unidos da América afeta o comportamento das *barreiras radiantes*, dividindo-se para tal este País em nove regiões climáticas com características distintas (Medina e Frempong, 2003). Os resultados mostraram que as *barreiras radiantes*, em termos médios, são mais eficientes no clima da Savana Tropical que abarca a ponta sul do Estado da Florida e menos eficientes no clima Mediterrâneo que abarca o Estado da Califórnia e regiões oeste dos Estados do Arizona e de Nevada.

Neste estudo foram realizadas análises do perfil do fluxo de calor, que atravessa a esteira horizontal, que possui isolamento térmico convencional de resistência igual a $3,5 \text{ m}^2\text{C/W}$, para as situações da aplicação ou não de barreira radiante num desvão ventilado (caudal superior a $1,3 \text{ l/(s.m}^2\text{)})$ localizado em várias regiões representativas do clima dos EUA, evidenciando-se, pelos resultados serem extremos, a região do clima do Savana Tropical, nomeadamente em Miami, bem como a região de clima Mediterrâneo, nomeadamente em São Francisco, sendo que o período do ano utilizado foi a mesmo e compreendeu os dias 25 a 31 de Julho relativo aos dados climáticos TMY2 de estações integradas nas respetivas regiões.

Comparando estes dois perfis de fluxo de calor foi possível concluir que para o clima da savana tropical o uso de *barreiras radiantes* é bastante útil tanto durante o dia como durante a noite pois os fluxos de calor têm o mesmo sentido descendente durante as 24 horas do dia. Verifica-se, igualmente, que em Miami, a redução de fluxo nos períodos de pico de calor é de cerca de 42%.

Já no respeitante ao clima mediterrâneo, o fluxo máximo de calor resultou numa redução de cerca de 97%. No entanto numa análise em todo o período do estudo verifica-se que a redução em São Francisco é muito inferior (2,3%) do que em Miami (36,8%). No respeitante ao período noturno verifica-se que o perfil do fluxo de calor é praticamente o mesmo da situação sem barreira radiante, não existindo assim custos substanciais na energia despendida para o aquecimento pelo facto de se instalar estas *barreiras radiantes*.

Evidencia-se no Quadro 4.8 o resumo do comportamento das *barreiras radiantes* em coberturas com desvão, situadas em cada uma das nove zonas climáticas dos EUA e para determinadas estações meteorológicas integrantes de cada uma, apresentando-se especificamente a percentagem de redução do fluxo não só integrada para todo o período de simulação mas também para a ocorrência da hora de pico.

Quadro 4.8
DESEMPENHO DAS BARREIRAS RADIANTES NAS VÁRIAS ZONAS CLIMÁTICAS DOS EUA
(Adaptado de Medina e Frempong, 2003)

Clima	Estação de Recolha de Dados	Integração da redução de fluxo no Verão (%)	Redução do fluxo máximo no Verão (%)
Húmido Subtropical	San Antonio, Texas New York- New York Atlanta, Georgia	34.3 32.5 38.5	31
Húmido Continental Verão Quente	Topeka, Kansas Indianapolis, Indiana	30.0 30.1	46
Desértico	Las Vegas, Nevada Tucson, Arizona	19.2 23.0	23
Húmido Continental Verão fresco	Minneapolis, Minnesota Detroit, Michigan	25.7 24.3	54
Estepe	Pocatello, Idaho Helena, Montana	16.0 13.7	36
Costa Marítima Oeste	Astoria, Oregon	9.6	~100
Mediterrânico	San Francisco, California	2.3	97
Áreas Altas Ocidentais	Boulder, Colorado	19.7	44
Savana Tropical	Miami, Florida	36.8	42

Como complemento ao estudo anterior, Medina e Young (2006) apresentam mais alguns dados sobre o comportamento das *barreiras radiantes* em coberturas nos EUA. Na Figura 4.23 apresenta-se o mapa dos EUA dividido nas nove zonas climáticas e para cada uma apresenta-se, em forma de gráfico de barras, a redução de fluxo de calor integrado a todo o período de simulação (SIPR) bem como a redução de fluxo para a hora de pico (PHPR) devido à utilização de *barreiras radiantes*.

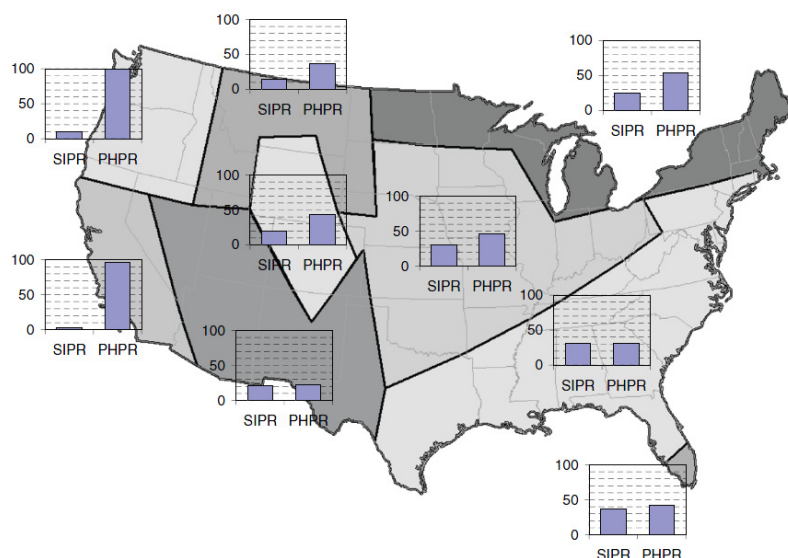


Figura 4.23
REDUÇÃO DO FLUXO DE CALOR PROPORCIONADO PELA APLICAÇÃO DE BARREIRAS
RADIANTES NOS EUA
(Medina e Young, 2006)

Os mesmos investigadores em 2008 apresentaram um estudo que, utilizando o modelo matemático, teve como objetivo a avaliação da sensibilidade do desempenho das *barreiras radiantes* a vários parâmetros climáticos, nomeadamente em relação à temperatura do ar, à humidade relativa, à radiação solar, ao índice de nebulosidade do céu bem como à latitude (Medina e Young, 2008). Pelos resultados, concluíram que dos cinco parâmetros só a temperatura ambiente, a humidade relativa e a latitude são efeitos de primeira ordem. Em relação à temperatura foi evidente a conclusão que as *barreiras radiantes* funcionam melhor para climas quentes do que para os frios. Na Figura 4.24 mostra-se um gráfico que evidencia a redução do fluxo de calor (Δq) através da esteira proporcionado pelas *barreiras radiantes*, em função da temperatura do ar.

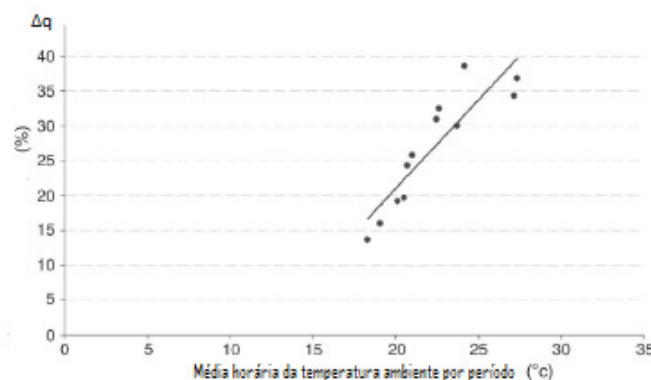


Figura 4.24
REDUÇÃO DO FLUXO DE CALOR PROPORCIONADA PELA APLICAÇÃO DE BARREIRAS
RADIANTES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO AR EXTERIOR
(Adaptado de Medina e Young, 2008)

Quanto à humidade relativa concluiu-se, igualmente, que em geral a eficiência das *barreiras radiantes* cresce com o seu aumento. Dos resultados obtidos não se inferiu, no entanto, que o uso de *barreiras radiantes* é sempre vantajoso em climas húmidos e sem benefícios nos climas secos. Existem climas secos, como o caso de zonas desérticas, em que o uso de *barreiras radiantes* é vantajoso e climas húmidos, como é o caso de São Francisco, já referido atrás, em que para humidades relativas de 70% apresenta reduções de fluxo bastante baixas. Isto permitiu concluir que é exatamente a associação de climas quentes e húmidos que resulta nas maiores vantagens, sendo que, entre ter um clima quente e seco e um frio e húmido, as *barreiras radiantes* são mais vantajosas no primeiro caso.

No que respeita à variação da resposta das *barreiras radiantes* com a latitude esta é evidentemente melhor de acordo com a diminuição da latitude Norte. Tal foi explicado com o facto de que quanto menor for a latitude norte (quanto mais próximo pois se estiver da linha do paralelo do equador) maior é a temperatura do ar exterior e a incidência da radiação solar.

Asadi, S. et al. (2012) realizaram uma avaliação do desempenho de um sistema de barreira radiante aplicado por baixo das vertentes da cobertura, em que a esteira do desvão está isolada termicamente com um material resistivo. Para tal desenvolveram um método de simulação numérica tridimensional em regime dinâmico baseado no método dos elementos finitos. Do estudo resultou que o assumir de um modelo bidimensional é inadequado para determinar com rigor as possibilidades de poupança de energia derivadas do uso de *barreiras radiantes*, pois por exemplo um modelo 2D não consegue incorporar com detalhe o efeito dos elementos estruturais.

A validação do modelo 3D foi realizada com recurso à comparação dos resultados com os de um ensaio experimental. Em termos de resultados da aplicação do modelo 3D evidenciou-se que nas condições consideradas, durante um dia típico do período de verão e durante o período mais quente do dia a temperatura na superfície superior da esteira (no isolamento resistivo) da habitação isolada com *barreiras radiantes* é 10°C inferior do que na situação sem este isolamento e de que o respetivo fluxo de calor que atravessa o teto é inferior em 21%. Foi, igualmente, utilizando o modelo 3D, realizado um estudo paramétrico para avaliar o desempenho das *barreiras radiantes* em função da

emissividade da telha, espessura da caixa de ar por cima da barreira radiante, bem como a emissividade e localização desta barreira, sendo que se concluiu que tem sobretudo uma influência significativa nos resultados, a variação da espessura da caixa de ar. Em relação à emissividade da barreira radiante a influência não foi muito significativa pois que neste estudo só se variou a mesma entre 0,03 e 0,05 (baseada nesta variação da emissividade os autores evidenciam que as *barreiras radiantes* podem refletir entre 95 e 97% da radiação de onda longa), que é o intervalo em que variam as emissividades das *barreiras radiantes* correntes aplicadas nos EUA.

Os mesmos autores e no mesmo ano publicaram aspetos complementares sobre o desempenho das *barreiras radiantes* através da utilização da mesma ferramenta 3D usada anteriormente (Asadi, S. et al., 2012). Assim, apresentaram para cada Estado dos EUA, a potencial poupança anual em dólares decorrente da aplicação de *barreiras radiantes* numa moradia padrão com 148 m² e com isolamento resistivo na laje de esteira de resistência térmica igual a 3,35 m²C/W (R-19) (Figura 4.25).

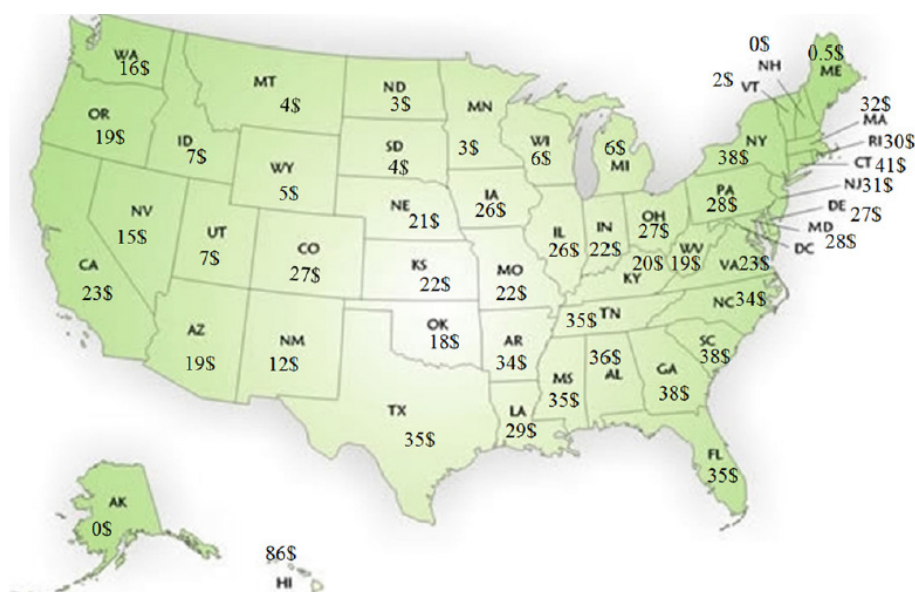


Figura 4.25
POUPANÇA ANUAL EM DÓLARES DEVIDO À APLICAÇÃO DE BARREIRAS RADIANTES
(Asadi, S. et al., 2012a)

Verifica-se que a influência do clima é evidente com maiores poupanças nos climas quentes e húmidos, ou seja nas regiões a sul e a sudeste. Evidencia-se o Havaí que apresentou a maior poupança anual (86 \$). No âmbito do mesmo estudo realizou-se uma

estimativa do custo da incorporação de *barreiras radiantes* na mesma moradia padrão chegando-se a valores que oscilam entre 160 e 240 \$.

Em 2014 publicou-se um estudo experimental que ocorreu em Louisiana durante oito meses, sobre a avaliação do desempenho térmico das *barreiras radiantes* aplicadas em coberturas de edifícios residenciais (Asadi, e Hassan, 2014), que examinou a redução dos consumos de energia para arrefecimento e aquecimento que podem ser atribuídos à utilização de *barreiras radiantes* e identificou os parâmetros ambientais que influenciam essa redução. Neste estudo instrumentaram-se duas casas construídas do mesmo modo, sendo que se concluiu que o uso de *barreiras radiantes* numa delas reduziu os consumos de energia entre 8 e 25%, dependendo das condições climáticas. Num dia típico de verão a temperatura de pico do ar do desvão de cobertura da casa com barreira radiante foi de menos 6°C do que a casa de controlo (sem barreira radiante). Também se concluiu que a radiação solar não é o fator que por si só é fundamental no desempenho das *barreiras radiantes*, mas sim a sua combinação com a temperatura do ar e a humidade ambiente.

Algarni e Darin (2015) estudaram a influência no desempenho térmico (absorção e ganhos de calor de radiação) da acumulação de pó nas *barreiras radiantes* de coberturas de edifícios localizados em climas quentes e húmidos. Foi desenvolvido um modelo para calcular o absorção da radiação solar em função da acumulação de pó, sendo que paralelamente foi usado um modelo para prever a média mensal da acumulação de pó ao longo do tempo, sendo que esta situa-se entre 1,3 e 73,8 g/(m².mês). Como resultados da aplicação do citado novo modelo obteve-se para esta acumulação de pó e para uma moradia padrão com área de 100 m², e para todas as localizações consideradas, um aumento de consumo anual de energia para arrefecimento entre 44,7 e 181,1 kWh/(m².ano) e para aquecimento uma diminuição entre 0,5 e 13,1 kWh/(m².ano). É pois evidente que a diminuição de consumo de energia de aquecimento é bem inferior ao aumento do consumo para arrefecimento, o que torna claro que a acumulação de pó nas *barreiras radiantes* tem um impacto negativo em termos de consumo anual de energia para climatização, sendo pois fundamental desenvolver metodologias para minorar este problema.

Park e Krarti (2016) analisaram o desempenho energético de sistemas de refletância variável para a envolvente de edifícios comerciais, como é o caso da aplicação de revestimentos de coberturas que podem alterar as suas propriedades refletantes de acordo com as condições ambientais exteriores e com as estratégias de controlo desejadas. Esta variação das propriedades óticas de materiais refletantes, já tem sido aplicada em diversos edifícios nos EUA, incluindo-se aqui as aplicações de vidro *inteligente*. É sabido que sistemas estáticos refletantes podem poupar energia para arrefecimento mas podem aumentar o consumo de energia para aquecimento. Deste modo tem todo o sentido o estudo de sistemas de refletância variável (*VRC - variable reflectivity coatings*) de modo a se otimizar a poupança de energia nos edifícios. Estes materiais VRCs têm a propriedade de variar as suas propriedades óticas de acordo com as alterações das condições ambientais exteriores. Assim, Park e Krarti (2016) realizaram uma análise comparativa para avaliar o impacto dos VRCs no consumo de energia em edifícios comerciais localizados em quatro climas dos EUA. Assim, face aos sistemas estáticos, concluiu-se para as condições do estudo, de que os VRCs têm o potencial para reduzir o consumo de energia nestes edifícios em valores superiores a 11%.

Ainda sobre os estudos desenvolvidos pelos EUA é importante referir que o Oak Ridge National Laboratory, Laboratório Nacional dependente do Departamento de Energia, tem realizado inúmeros estudos com excelentes resultados sobre *barreiras radiantes*. Cita-se, por exemplo, o estudo efetuado do sistema “ThermaDeck” da Billy Eliis Roofing Company que comercializa um sistema para instalação nas vertentes das coberturas, que atua nas três formas de transferência de calor, sendo basicamente constituído por placas rígidas que associam poliestireno a folha de alumínio associado a um sistema de ventilação constituído por entradas de ar nos beirais e saída nos cumes (Billy Eliis Roofing Company.[Em linha]. Disponível em <http://www.billyellisroofing.com/thermadeck.html>).

É fundamental evidenciar que o Governo dos EUA tem publicado uma série de documentos sobre aplicação de proteções térmicas refletantes, como é exemplo o documento emanado do Departamento de Energia (DOE, 1997) em que fixa as características dos produtos e os processos de aplicação tanto dos isolamentos resistivos como dos refletantes ou de várias normas ASTM conexas com os isolamentos

refletantes como é o caso das ASTM C1483-00, ASTM C727-01, ASTM C1313, ASTM C1158, ASTM C1224, ASTM C1371 e ASTM C1340/C1340M-10, sendo que a última integra inclusivamente o desenvolvimento de um programa informático para estimar o desempenho das *barreiras radiantes* em coberturas de edifícios.

4.5 ESTUDOS REALIZADOS EM ESPANHA

Em 2005 o chefe do Departamento de Engenharia do Instituto do Frio publica um artigo sobre a prestação nos edifícios dos denominados filmes refletantes (Dominguéz, 2005), alertando para uma série de situações relevantes. É referido que é muito discutível a simplificação que é realizada vulgarmente, a nível comercial, de comparar o uso destes materiais refletantes com determinadas espessuras dos materiais de isolamento tradicionais ou resistivos, pois a resistência térmica efetiva dos isolamentos refletantes varia muito com as condições de ensaio e que, no caso da aplicação em obra se afastar bastante daquelas condições, os erros na avaliação da resistência térmica podem ser enormes. Para paredes tradicionais, construídas em Espanha, com caixas-de-ar semi-ventilada e colocação do filme refletante no centro da mesma, Dominguéz (2005) estimou que tal equivale a colocar na caixa-de-ar material de isolamento tradicional com 2 cm de espessura, podendo assim apontar-se que se pode chegar a obter valores da resistência térmica de $0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ (Figura 4.26), vincando-se que valores superiores a este, que muitas vezes aparecem em informações comerciais, não são reais.

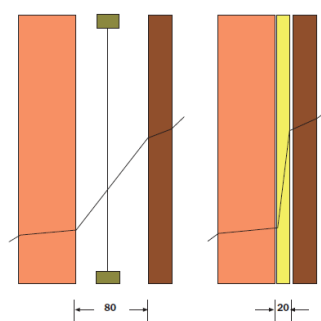


Figura 4.26
EQUIVALÊNCIA ENTRE O COMPORTAMENTO DE ISOLAMENTOS REFLETANTES E
ISOLAMENTOS TRADICIONAIS
(Dominguéz, 2005)

É igualmente alertado que em ensaios comparativos reais, as características das células de ensaio podem influenciar bastante nos resultados. Deste modo, não se deve fixar uma resistência térmica para estes materiais de isolamento, nem comparar com as espessuras de materiais resistivos, sem indicar qual a norma de ensaio seguida, bem como qual a

natureza dos materiais e as temperaturas atingidas pelas superfícies refletantes. As resistências térmicas dos isolamentos refletantes podem variar bastante de acordo com a metodologia de aplicação seguida, não podendo assim generalizar-se os valores obtidos para o setor da construção. É assim sustentado que as prestações dos isolamentos refletantes não podem ser comparadas às dos isolamentos tradicionais resistivos pois os primeiros foram concebidos para resistir à transmissão de calor por radiação e não para resistir à transmissão de calor por condução como é o caso primordial dos segundos. Segundo Dominguéz (2005), a aplicação exclusiva de materiais de isolamento refletantes pode ser interessante em construções de madeira unifamiliares, em edifícios agrícolas e industriais, sobretudo com coberturas metálicas ou de fibrocimento, e em climas quentes, sendo que em construções em que a aplicação seja em caixas-de-ar é muito difícil atingir valores reais de resistência térmica que cumpra o Código Técnico de Edificação Espanhol e nos Países Nórdicos tal situação é completamente impossível. É também evidenciada a grande dependência do funcionamento dos isolamentos refletantes com a emissividade das suas superfícies, sendo que esta é substancialmente afetada pela deposição de poeira bem como pela oxidação por ataque químico. Outra situação relevante e que pode em muito diminuir o desempenho destes isolamentos é a possível existência de materiais plásticos a revestir as suas superfícies.

No respeitante à colocação nas caixas de ar das películas refletantes é defendido que o melhor comportamento é quando a película é instalada no centro da caixa de ar, de forma a conseguir-se o contacto com o ar de um e do outro lado do isolamento. Na Figura 4.27 mostra-se uma esquematização desta solução em paredes.

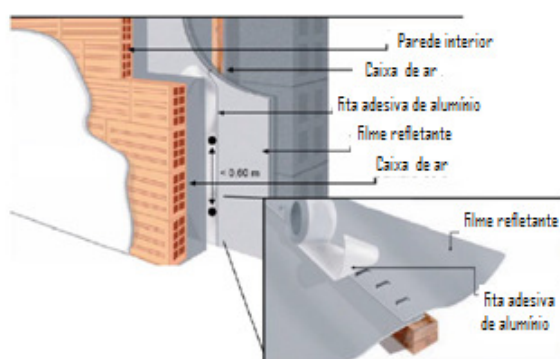


Figura 4.27
COLOCAÇÃO DE ISOLAMENTOS REFLETANTES EM PAREDES COM A FORMAÇÃO DE
DUAS CAIXAS DE AR
(Adaptado de DIT, 2009)

O esquema da Figura anterior foi retirado de um DIT, relativo a um fabricante de Barcelona (DIT, 2009), executado pelo Instituto de Ciências da Construção Eduardo Torroja (IETcc), que de forma a atestar o uso, na construção, de materiais, sistemas e procedimentos não tradicionais, como é o caso dos isolamentos refletantes, realiza apreciações técnicas designadas por documentos de idoneidade técnica (DIT). O DIT é um documento com carácter voluntário solicitado pelo fabricante do material, sistema ou procedimento construtivo em apreciação. O primeiro DIT executado pela IETcc foi uma convalidação de um AVIS Technique do CSTB Francês (Blázquez, 2009).

Para todos os sistemas de isolamentos refletantes, os DITs alertam para o facto de que estes devem aplicar-se em caixas-de-ar estanques com o mínimo de 2 cm de espessura de forma a obter-se a maximização do desempenho do material. De seguida, são referidos em todos os documentos as características (reação ao fogo, resistência à difusão do vapor de água, emissividade, resistência mecânica, durabilidade, entre outros) e respectivas tolerâncias dos componentes do produto, bem como a metodologia de fabrico. Também se abordam os cuidados a ter com o armazenamento do material bem como com a apresentação do produto final. É depois a vez de se abordarem os cuidados na operação de colocação em obra, nomeadamente nos tipos de suportes admitidos, nos tipos de fixação e seu número, forma e cuidados de aplicação, como por exemplo os cuidados a ter com pontos singulares como é o caso de atravessamento de tubagens. Também se referenciam as obras mais relevantes onde o produto foi aplicado.

No respeitante à poupança energética e isolamento térmico conferidos por estes materiais refletantes em contacto com caixas de ar, todos os DITs determinam um valor para a respetiva resistência térmica tendo em conta a norma UNE EN 6946 (UNE EN, 2012). Os resultados são apresentados para várias espessuras reais das caixas de ar (2; 4 e 10 cm), para fluxos de calor ascendentes, descendentes e horizontais, bem como para várias temperaturas (-10°C; 10°C; 23°C e 80°C), sendo que dos valores apresentados podem-se tirar as seguintes conclusões:

- As maiores resistências térmicas verificam-se para as situações de fluxos descendentes, sobretudo quando maior for a espessura das caixas de ar;
- As menores resistências térmicas verificam-se para fluxos de calor ascendentes;
- O aumento da espessura das caixas de ar não altera a resistência térmica relativa a fluxos horizontais e ascendentes;

- O aumento da espessura das caixas de ar aumenta a resistência térmica relativa a fluxos descendentes;
- Quanto maior for a temperatura, maior é a emissão de calor e menor é a resistência térmica;
- Em algumas situações do uso de proteções térmicas refletantes com uma só superfície de baixa emissividade, para fluxo descendente e para 23°C podem-se obter valores da resistência térmica da ordem dos 1,6 m²°C/W, quando sem estas proteções o valor indicado é de 0,22 m²°C/W (Santos e Matias, 2006).

Escudero et al. (2013) realizaram um estudo experimental de caracterização térmica das *barreiras radiantes* com material refletante em ambas as superfícies, para o isolamento térmico dos edifícios. Foram desenvolvidos ensaios laboratoriais, nomeadamente o da caixa quente guardada, para obter o valor da resistência térmica dessas *barreiras radiantes*. Os resultados foram comparados com o modelo simplificado da EN ISO 6946 (CEN (2007), bem como com um modelo CFD (*Computational Fluid Dynamic*). Conclui-se que os testes laboratoriais são válidos para caracterizar termicamente as *barreiras radiantes* bem como a metodologia simplificada da EN ISO 6946, desde que se conheça as propriedades refletantes e a condutibilidade do material. Com esta investigação concluiu-se, igualmente, que a incerteza das propriedades térmicas das *barreiras radiantes* podem originar grandes diferenças na resistência térmica, como é o caso da emissividade que normalmente pode variar de 0,03 a 0,3 (Figura 4.28)

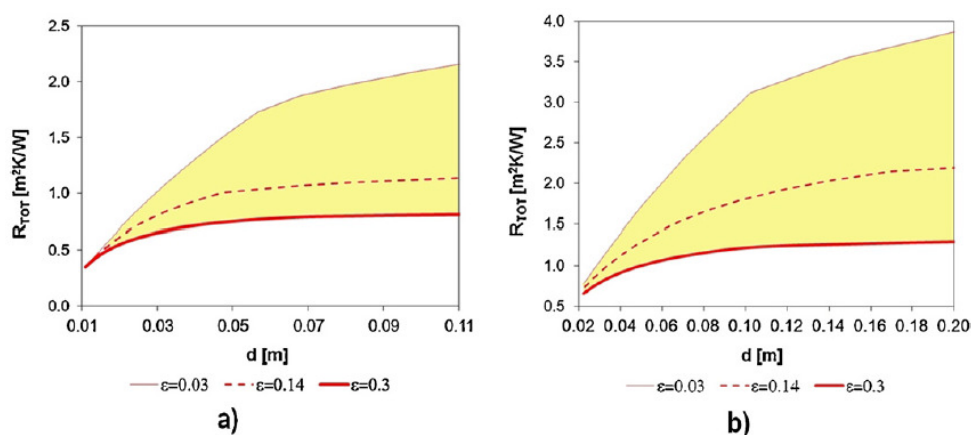


Figura 4.28 (a e b)
 VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA COM A ESPESSURA DAS CAIXAS DE AR E COM A EMISSIVIDADE DAS BARREIRAS RADIANTES
 (Escudero et al., 2013)

Na Figura anterior $d(m)$ é a espessura da lâmina de ar, no caso de só ser uma (a) ou as espessuras de cada uma das duas lâminas de ar, que estão em contacto com cada superfície refletante da barreira radiante (b).

4.6 ESTUDOS REALIZADOS NA AUSTRÁLIA

Em 2011 foi publicado um estudo executado durante os anos de 2008 e 2009 no Sul da Austrália (Belusko, Bruno e Saman, 2011) em que o objetivo foi a comparação para a estação de inverno do comportamento de coberturas com desvão, ora com isolamentos constituídos por película refletante, ora com isolamentos resistivos, sendo que o fluxo de calor seguiu sempre o sentido ascendente, ou seja do interior das células para o exterior. Este estudo comportou o desenvolvimento de ensaios experimentais e a comparação com resultados calculados analiticamente. No que concerne à parte experimental, foram utilizadas duas células, monitorizadas, em que as paredes foram construídas em EPS e as coberturas foram realizadas com aço galvanizado ondulado, sendo aplicado em ambas isolamento térmico resistivo em todo o desenvolvimento resultante da ligação da cobertura com as fachadas. Foram também analisados em detalhe os modelos numéricos que se usam para o cálculo das resistências térmicas destas soluções e das diferenças que daí podem derivar.

Belusko, Bruno e Saman (2011) referem que a célula 1 foi isolada por debaixo das vertentes da cobertura com material refletante com ambas as superfícies de baixa emissividade (0,03 de ambos os lados), sendo que no seu interior existe um substrato em plástico de bolha (Figura 4.29).



Figura 4.29

DESVÃO DE COBERTURA DA CÉLULA 1 COM APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO REFLETANTE
(Belusko, Bruno e Saman, 2011)

Quanto à célula 2, esta inicialmente foi ensaiada sem qualquer isolamento térmico, sendo que posteriormente foi isolada termicamente sobre a esteira e sucessivamente com lã de vidro (Figura 4.30) de duas espessuras diferentes e como tal com duas distintas resistências térmicas. Também a mesma célula 2, noutra situação testada, foi isolada termicamente com EPS.



Figura 4.30
DESVÃO DE COBERTURA DA CÉLULA 2 COM APLICAÇÃO DE LÃ DE VIDRO
(Belusko, Bruno e Saman, 2011)

As resistências térmicas dos vários sistemas de cobertura foram calculadas através dos valores medidos da média do fluxo de calor e das diferenças de temperatura entre a superfície inferior do telhado e a superfície inferior do teto de acordo com a seguinte expressão:

$$R_t = \frac{T_t - T_c}{Q} \quad [4.2]$$

Em que:

- R_t é a resistência térmica do sistema de cobertura em $m^2\text{°C/W}$;
- T_t é a temperatura da superfície inferior da cobertura em °C ;
- T_c é a temperatura da superfície inferior do teto em °C ;
- Q é o fluxo de calor em W/m^2 .

Para se medir com rigor o fluxo de calor, foi criado por baixo do teto das duas células uma cavidade com uma altura de 30 cm, obtida através da aplicação de uma placa de EPS com 20 cm de espessura. Ao utilizar-se uma cavidade com uma altura reduzida o fluxo de calor através das paredes (que cumulativamente possuem isolamento térmico de bordo) é bastante minimizado o que é benéfico para o estudo empreendido. Dentro desta cavidade, e em cada célula, foram instalados um sistema de aquecimento de 500 W e um ventilador mecânico com 60 W de potência. Os sistemas de aquecimento eram controlados de modo a manter a temperatura do teto das duas células a 25°C , com exceção do teste inicial, sem aplicação de qualquer isolamento, que foi realizado na

célula 2, em que a temperatura foi mantida a 20°C, pois esta foi a temperatura utilizada de referência relativamente ao valor conhecido previamente da resistência térmica. O funcionamento do ventilador induz uma circulação contínua do ar, mantendo assim a temperatura uniforme, condição essencial para ser possível comparar com rigor os resultados. Por baixo da cavidade foi montado um sistema de condicionamento do ar para manter o espaço interior da célula a 25°C, minimizando as transferências de calor provenientes da cavidade, o que é importante para o rigor do estudo empreendido. Na Figura 4.31 apresenta-se um esquema de uma das células.

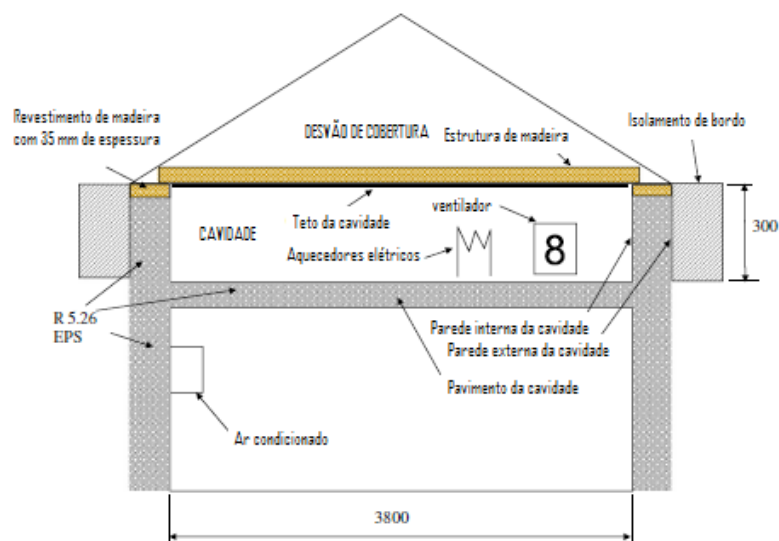


Figura 4.31

ESQUEMATIZAÇÃO DE CÉLULA DE ENSAIO UTILIZADA POR BELUSKO, BRUNO E SAMAN
(Adaptado de Belusko, Bruno e Saman, 2011)

O fluxo de calor através das paredes e pavimento representaram menos de 5% do fluxo de calor total na cavidade. O fluxo de calor médio através da cobertura pôde assim ser calculado para cada período em estado estacionário:

$$Q_r = Q_h - Q_w - Q_f \quad [4.3]$$

Em que:

Q_r – Fluxo de calor através da cobertura;

Q_h – Fluxo de calor total medido através da energia gasta pelo sistema de aquecimento;

Q_w – Fluxo de calor através das paredes da cavidade;

Q_f – Fluxo de calor através do pavimento da cavidade.

As configurações testadas na célula 2 incluíram o uso de lã de vidro com uma classificação nominal R3 e R2 (R – resistência térmica em m²°C/W), EPS e por fim a

situação de sem qualquer isolamento térmico. O isolamento com lã de vidro foi testado independentemente de acordo com a norma ASTM C518-04 (*cit in. Belusko, Bruno e Saman, 2011*) que implementa um método de teste normalizado, pelo processo do fluxímetro, para a transmissão de calor em regime estacionário, sendo que o R medido para R3 foi de $2,77 \text{ m}^2\text{C/W}$ para R2 de $1,83 \text{ m}^2\text{C/W}$, determinado para uma temperatura média de 23°C . O EPS, com 5 cm de espessura, de acordo com as especificações dos fabricantes tinha uma resistência térmica de $1,19 \text{ m}^2\text{C/W}$ para uma temperatura média de 20°C . A Figura 4.32 mostra, para um dia típico, que as temperaturas do teto da cavidade são praticamente constantes e idênticas em ambas as células, sendo que na célula 2 estava aplicada a lã de vidro R3 e na célula 1 o isolamento refletante. Cumulativamente e na mesma Figura mostra-se as evoluções da temperatura do ar ambiente e da diferença de temperatura (ΔT) relativa aos tetos das cavidades das duas células.

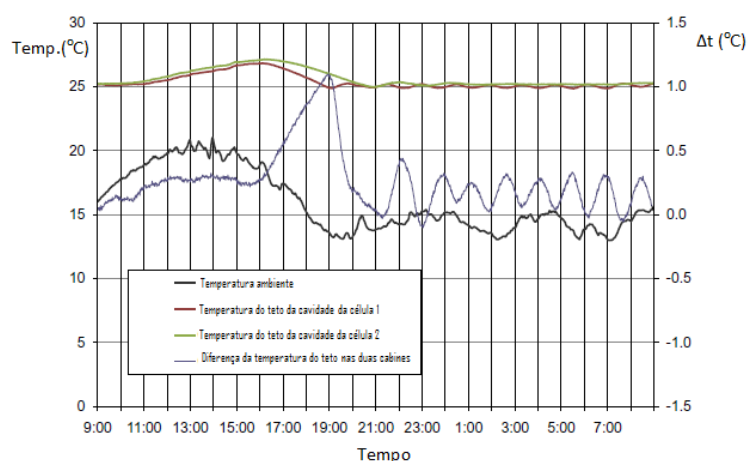


Figura 4.32
TEMPERATURAS DO TETO PARA O USO DE LÃ DE VIDRO R3 NA CÉLULA 2 E ISOLAMENTO REFLETANTE NA CÉLULA 1
(Adaptado de Belusko, Bruno e Saman, 2011)

Pela análise do gráfico anterior, conclui-se que para ambas as situações a temperatura sobe um pouco em relação aos 25°C (temperatura mantida pelo sistema de aquecimento pois a temperatura ambiente do exterior é inferior, atingindo um máximo sensivelmente de 20°C) a partir sensivelmente das 10h da manhã e até às 19h na célula 1 e às 20h na célula 2. Verifica-se, ainda, que a temperatura na célula 2 atinge valores superiores à da célula 1 em especial entre as 16h e as 20h, atingindo-se sensivelmente às 19h uma diferença de $1,1^\circ\text{C}$, sendo que aqui se evidencia o poder de isolamento por reflexão da configuração instalada na célula 1. Na Figura 4.33 apresenta-se os valores das médias

horárias do fluxo de calor através do teto da cavidade que variou durante o dia e foi relativamente constante durante a noite.

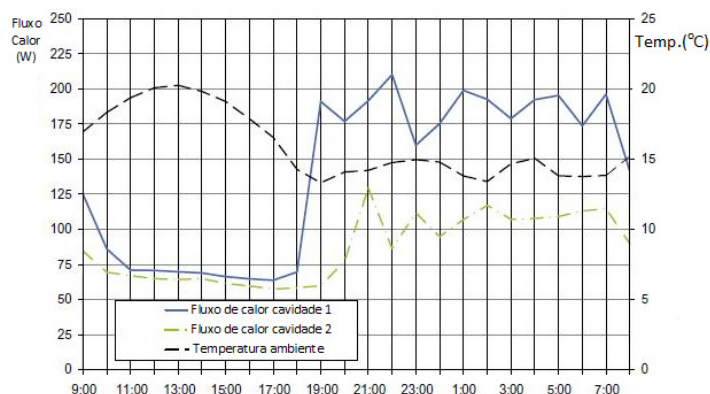


Figura 4.33

FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DO TETO PARA O USO DE LÃ DE VIDRO R3 NA CÉLULA 2 E ISOLAMENTO REFLETANTE NA CÉLULA 1
(Adaptado de Belusko, Bruno e Saman, 2011)

Pela análise do gráfico anterior, verifica-se que durante o período de maior temperatura do ar exterior os fluxos para as duas configurações são idênticos, enquanto nos períodos de temperaturas ambientes exteriores mais baixas, nomeadamente durante a noite, o fluxo de calor respeitante à configuração com isolamento refletante é bem superior ao fluxo respeitante ao uso da lã de vidro R3. Deste modo, pode-se concluir que se consome mais energia para aquecer as células a 25°C na situação do uso do isolamento refletante do que no caso do isolamento com lã de vidro R3. Pode, assim, e ainda concluir-se que na situação de temperaturas exteriores entre os 13 e os 20°C é mais indicado o uso de isolamentos resistivos do que refletantes, embora aqui a diferença de comportamento foi muito vincada porque a espessura usada para a lã de vidro foi de 145 mm, situação que em Portugal não é comum aplicar.

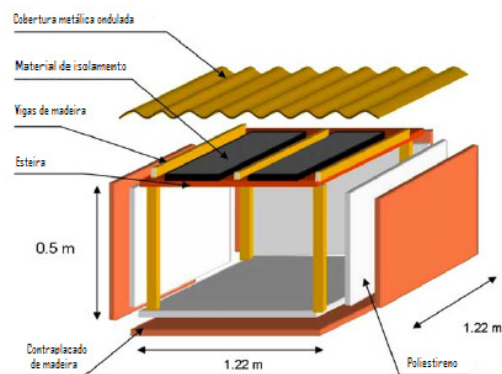
Belusko, Bruno e Saman (2011) verificaram ainda que a temperatura do desvão de cobertura é próxima da temperatura do teto na célula 1 e próxima da temperatura exterior na célula 2. Verificaram, ainda, que a temperatura do telhado da célula 1 é maior do que a da célula 2, refletindo tal o facto que o fluxo de calor ascendente é superior na primeira situação. Os níveis de humidade também foram registados no desvão de cobertura de ambas as células. Como não existiu produção de vapor de água dentro das células, os níveis medidos dependeram da humidade relativa dentro do desvão que atingiu um máximo de 40% na célula 1 e 90% na célula 2, evidenciando-se pois o funcionamento de barreira para-vapor do isolamento refletante.

Em 2010 foi publicado um estudo executado igualmente no mesmo local do Sul da Austrália (sendo as medições realizadas uns meses antes das efetuadas no estudo referido anteriormente) que teve como objetivo avaliar para as mesmas células a diferença entre a resistência térmica obtida usando ora isolamentos refletantes ora resistivos em coberturas com desvão e estrutura de madeira, só que em situação de clima de verão, ou seja para fluxos de calor descendentes. Igualmente este estudo teve o objetivo de avaliar os benefícios do uso de pinturas refletantes na cobertura (Belusko et al., 2010). Dentro da mesma cavidade do estudo anterior, e em cada célula, foram instalados o mesmo sistema de climatização, que neste caso vai arrefecer o espaço de modo a igualmente o manter a 25°C, e o mesmo ventilador mecânico. Neste estudo, a célula 1 continuou a receber o mesmo isolamento refletante e a célula 2 o mesmo isolamento em lã de vidro R2 e R3. Analisando os resultados dos fluxos de calor, pode-se inferir que o uso do isolamento refletante resulta num fluxo de calor superior em 28% do que o ocorrido na mesma cobertura com a aplicação de lã de vidro R3. Análise homóloga permitiu concluir que em relação à aplicação da lã de vidro R2 o aumento de fluxo de calor foi de 10%. Foram igualmente determinadas as resistências térmicas das várias soluções para fluxo descendente, concluindo-se que, para estas condições de ensaio, o uso de isolamento refletante é equivalente à aplicação de lã de vidro R2. Já em relação ao uso de lã de vidro R3 verificou-se que esta solução apresenta uma resistência térmica superior em 22% à obtida pela aplicação do isolamento refletante.

4.7 ESTUDOS REALIZADOS EM FRANÇA

Em 2005 foi publicado um estudo realizado na Guiana Francesa que teve como objetivo determinar o impacto das *barreiras radiantes* nas transferências de calor bem como realizar a comparação do desempenho das mesmas com o relativo aos materiais resistivos tradicionais para climas tropicais (Soubdhan, Feuillard e Bade, 2005).

Para este estudo foram utilizadas quatro células, cuja cobertura foi realizada com chapas de aço onduladas, sendo que por baixo das mesmas se colocou o material de isolamento térmico a ensaiar. Fizeram-se diversos ensaios em que se variou a absorção da cobertura bem como a ventilação do espaço entre a cobertura e a esteira. Na Figura 4.34 mostra-se o tipo de célula que foi usada.

**Figura 4.34**

MODELO DE CÉLULA DE ENSAIO USADA POR SOUBDHAN, FEUILLARDN E BADE
(Adaptado de Soubdhan, Feuillard e Bade, 2005)

Para aferir a influência da ventilação exercida no espaço entre a cobertura e a esteira, bem como para comparar a influência da existência de uma superfície refletante no sistema de isolamento, realizaram-se ensaios nas quatro células em que cada uma possuía a seguinte configuração:

- Célula 1 (CRBNV): Integrava uma barreira radiante com emissividade de 0,05 em que o espaço entre esta e a chapa de cobertura não foi ventilado;
- Célula 2 (CRBV): Integrava uma barreira radiante com emissividade de 0,05 em que o espaço entre esta e a chapa de cobertura foi ventilado;
- Célula 3 (BV): Integrava o plástico-bolha, de polietileno, constituinte da barreira radiante mas sem a superfície refletante e o espaço entre aquele e a chapa de cobertura foi ventilado;
- Célula 4 (BNV): Integrava o plástico-bolha, de polietileno, da barreira radiante mas sem a superfície refletante e o espaço entre aquele e a chapa de cobertura não foi ventilado.

Analisando os resultados obtidos das temperaturas superficiais, concluiu-se que ventilar o espaço entre a barreira radiante e a chapa de cobertura, permite:

- Uma redução da temperatura máxima da chapa de aço em quase 10°C;
- Uma redução da temperatura máxima do espaço em sensivelmente 15°C;
- Que a temperatura máxima do espaço seja 5°C menor do que a temperatura máxima na superfície da barreira radiante. É de evidenciar, que na situação do espaço não ventilado, a temperatura máxima do ar deste é 4°C superior à temperatura superficial máxima da barreira radiante.

Já no respeitante aos resultados das temperaturas obtidas no interior de cada uma das quatro células, indicadas anteriormente, pode-se concluir o seguinte:

- Na situação de desvão não ventilado, a existência da superfície refletante permite uma redução de cerca de 4°C na temperatura do ar interior da célula;
- Na situação do desvão ventilado, a existência da superfície refletante permite uma redução de cerca de 1°C na temperatura do ar interior da célula.

Verifica-se pois que, para estas condições de ensaio, a maior influência do uso de superfícies refletantes dá-se para o caso do desvão não ser ventilado, embora não se recomende tal procedimento. Outra análise efetuada, foi a influência do coeficiente de absorção solar da chapa de revestimento, no fluxo de calor que atravessa a cobertura para vários tipos de sistemas de isolamento térmico. Apresenta-se no Quadro 4.9 os resultados da comparação do fluxo de calor que atravessa a cobertura, na situação de desvão não ventilado, para o uso de chapas de cobertura com coeficiente de absorção da radiação tanto igual a 0,3 bem como a 0,9, com o fluxo relativo à situação de referência de não existência de isolamento térmico. Esta análise foi efetuada para o período entre as 9h e as 16h, sendo que os valores positivos apresentados no Quadro representam um aumento de fluxo comparado com a célula de referência e os valores negativos significam uma redução de fluxo de calor comparado com a célula de referência.

Quadro 4.9
VARIAÇÃO DO FLUXO DE CALOR EM FUNÇÃO DO TIPO DE ISOLAMENTO E DO
COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SOLAR DO REVESTIMENTO DA COBERTURA
 (Adaptado de Soubdhan, Feuillard, Bade, 2005)

Configuração	Total de variação do fluxo de calor (%) para $\alpha = 0,3$	Variação do fluxo de calor por radiação (%) para $\alpha = 0,3$	Total de variação do fluxo de calor (%) para $\alpha = 0,9$	Variação do fluxo de calor por radiação (%) para $\alpha = 0,9$
Barreira radiante com $\varepsilon = 0,05$	-37	-50	-33	-46
Poliestireno com 4 cm de espessura	-84	-100	-73	-100
Fibra de vidro com 4,5 cm de espessura	-88	-100	-78	-100

Na procura do desenvolvimento de modelos matemáticos que simulem o desempenho de coberturas que incluam *barreiras radiantes* foram realizados vários estudos na Universidade de Reunião, na Ilha de Reunião, França. Em 2003 é validado um modelo matemático com recurso a experimentação usando uma célula em que a sua cobertura

era constituída por uma água inclinada a 20° em chapa ondulada de cor azul escura e isolada inferiormente com uma barreira radiante (Miranville et al., 2003).

Neste estudo começa-se por realizar uma revisão bibliográfica dos vários trabalhos realizados até então, evidenciando-se que a maior parte deles são oriundos dos Estados Unidos da América, sendo que os de maior relevo apontam para que a solução mais vantajosa é a aplicação das *barreiras radiantes* em complemento com os isolamentos resistivos. Foi evidenciado que na França a utilização de *barreiras radiantes* é mais recente do que nos Países Anglo-Saxónicos, sendo que o habitual é a sua colocação não estar associada a nenhum material de isolamento resistivo, aplicando-a por baixo do revestimento de cobertura. Também foi focado o facto que a ilha de Reunião apresenta um clima tropical húmido e como as coberturas são muitas vezes realizadas com chapas onduladas de aço, as temperaturas atingidas nas mesmas são por vezes muito elevadas, justificando-se, pois, o uso das *barreiras radiantes*. No entanto, os autores alertaram que esta solução do uso de *barreiras radiantes*, tem o problema de não estar previsto nos Regulamentos de Construção Franceses, bem como o da complexidade técnica que envolve a simulação do respetivo desempenho. Deste modo, foi desenvolvido no âmbito deste estudo, um modelo matemático em ambiente Matlab, onde adaptações importantes na transferência de calor por radiação e convecção foram realizadas para a cabal simulação dos inerentes fenómenos físicos associados. A configuração da cobertura estudada está esquematizada na Figura 4.35, onde se pode visualizar os vários setores que a mesma encerra tanto a nível inferior à barreira, por causa dos perfis de apoio da mesma, bem como a nível superior por causa das vigas, em perfil U, de apoio das chapas de revestimento da cobertura.

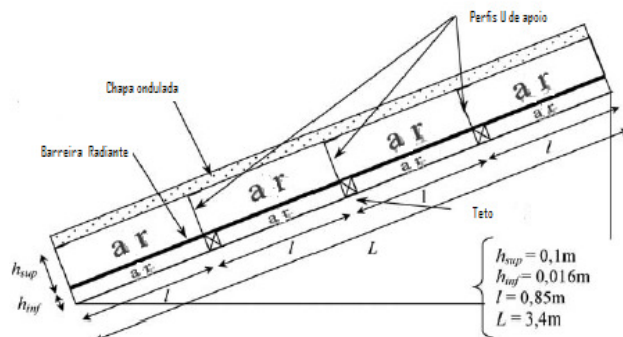


Figura 4.35
CORTE DA COBERTURA OBJETO DO ESTUDO DE MIRANVILLE ET AL.
(Adaptado de Miranville et al., 2003)

Como no início existia pouca informação, optou-se por detalhar o mais possível o modelo, usando, como zonas térmicas, os oito espaços representados na Figura anterior. No entanto, devido a dificuldades de análise numérica em que se evidenciou o tempo despendido no cálculo e também pelas dificuldades inerentes à consequente necessidade da validação do modelo, optou-se por otimizar o mesmo, começando-se por transformar os quatro espaços de ar inferiores à barreira num único. O facto da transferência de calor por radiação ser minimizada devido à existência da barreira radiante, tal implica que será a transferência por convecção laminar que possui um importante efeito esperando-se pois um comportamento muito similar nas referidas quatro zonas térmicas. De notar que esta convecção laminar, resultante do facto da superfície superior, chapa da cobertura, estar mais quente, é assim estável e é equivalente à condução do calor através do próprio ar.

Para a validação empírica do modelo matemático através de ensaios, foi usada a célula já referenciada devidamente instrumentada com sondas de temperatura (do ar, superficial, e de globo negro) e com fluxímetros, tal e qual se indica na Figura 4.36.

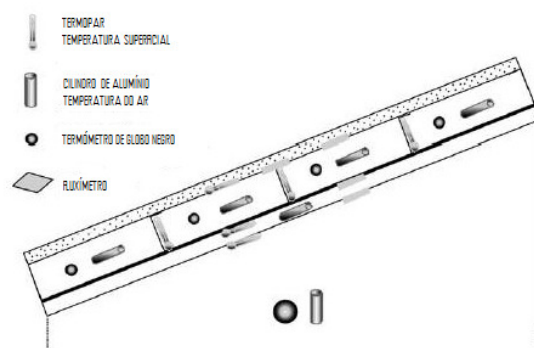


Figura 4.36
INSTRUMENTAÇÃO DA CÉLULA DE ENSAIO DE MIRANVILLE ET AL.
(Adaptado de Miranville et al., 2003)

Depois de realizados os ensaios, inicialmente num período típico de verão, compararam-se os resultados do modelo matemático com os resultantes da experimentação, tendo-se concluído que os erros encontrados podem ser considerados aceitáveis, mas que podem e devem ser minorados por análises complementares. Para a validação ser mais segura e ainda no âmbito deste estudo realizou-se o mesmo ensaio experimental num outro período do ano (transição entre verão e inverno) e chegou-se a

resultados igualmente aceitáveis. Finalizou-se este estudo com propostas de trabalhos futuros, como foi o caso do desenvolvimento de um modelo ainda mais simplificado, com menos zonas térmicas para a cobertura.

Já em 2006, e na mesma Universidade da Ilha de Reunião, e na sequência das conclusões do estudo anterior e para a mesma cobertura, foi publicado um trabalho em que se usou o teorema de Bayes (Thomas Bayes, Matemática Britânico, 1701-1761) para a estimativa de coeficientes de convecção que diminuíram ainda mais os erros entre o modelo matemático e o modelo experimental (Lauret et al., 2006).

Mais tarde, em 2008, é publicado mais um estudo da Universidade de Reunião, em que utilizando a mesma cobertura e a partir de análises de sensibilidade, acabou-se por propor uma simplificação ao modelo matemático anterior de seis zonas térmicas, passando-se para unicamente três. Além disso, e para suprir as dificuldades de aplicação de *barreiras radiantes*, pelo facto de não estarem diretamente contempladas na Legislação Francesa, desenvolveu-se uma metodologia de cálculo da resistência térmica equivalente destas soluções, para que com este parâmetro possa efetuar-se a necessária comparação com os respetivos limites Regulamentares. Igualmente, e com este valor da resistência térmica equivalente, realizou-se a comparação com os materiais de isolamento resistivos em termos da espessura necessária para que o desempenho seja o mesmo do das *barreiras radiantes* (Miranville et al., 2008). Na Figura 4.37 mostra-se o modelo matemático simplificado considerado, que optou por juntar as quatro zonas térmicas situadas por cima da barreira radiante.

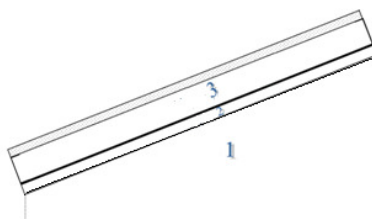


Figura 4.37
MODELO SIMPLIFICADO DE COBERTURA COM 3 ZONAS TÉRMICAS
(Miranville et al., 2008)

Pela análise dos resultados das diferenças de temperatura obtidas para a zona 2 entre o modelo simplificado de três zonas e o mais detalhado com seis zonas, verificou-se que estas ficaram acima do que se considerou como sendo aceitável, concluiu-se que a assunção que a transferência de calor através das camadas de ar ser só devido à

condução não é completamente correta. Deste modo, realizou-se a otimização das condutibilidades equivalentes para as camadas de ar, tendo-se obtido valores que foram considerados dentro dos critérios de admissibilidade definidos pelos investigadores, sendo o modelo simplificado otimizado passível de ser considerado como uma parede multicamada, em que se podem considerar condutibilidades equivalentes para as camadas constituintes, sendo, assim, possível calcular a resistência térmica total, tendo-se chegado ao valor de $3 \text{ m}^2\text{C/W}$. Deste modo, foi possível fixar-se para este elemento construtivo um coeficiente de transmissão térmica, U , de valor igual a $0,33 \text{ W/(m}^2\text{C)}$, que comparado com os limites da Regulamentação Francesa seria uma solução legal. Foi igualmente possível calcular, para o período de ensaio, a espessura equivalente de material resistivo. Assim, considerando a espuma de poliuretano com condutibilidade térmica de $0,032 \text{ W/(m}^2\text{C)}$, essa espessura seria igual a 6,91 cm.

É relevante referir que a Commission Chargée de Formuler des Avis Techniques (2007), apresentou um documento cujo objeto é a avaliação do desempenho de produtos opacos refletantes utilizados na envolvente do edifício como complemento do isolamento térmico tradicional. Este documento responde a uma série de questões sobre a aplicação de produtos refletantes, sendo que no seu anexo apresenta o cálculo da resistência térmica de soluções construtivas de paredes, coberturas e pavimentos que integram conjuntamente isolamentos térmicos tradicionais e produtos opacos refletantes, pois que como é referido nas conclusões do documento, tal é apropriado para atender às exigências Regulamentares Francesas.

Por fim, em 2011, e fruto da colaboração entre três investigadores da Universidade de Reunião e de um Americano da Universidade do Kansas, cujos outros estudos já foram referenciados anteriormente, desenvolveu-se um outro modelo simplificado (Miranville et al., 2011) para a mesma cobertura objeto de estudo nos trabalhos efetuados na ilha de Reunião. Desta vez, a ideia seria a de utilizar, no respeitante às trocas de calor por radiação, uma metodologia mais simples e rápida de calcular, do que o método de referência para estes casos que é o método não linear da rede de radiosidade que serve para todas as situações e que usa o conceito de fatores de vista.

4.8 ESTUDOS REALIZADOS EM ITÁLIA

Baldinelli (2010) desenvolveu na Universidade de Perugia um estudo com o objetivo de determinar o desempenho de paredes que contêm no seu interior *barreiras de baixa emissividade* tendo para tal desenvolvido um modelo teórico que foi validado com o uso de outros modelos matemáticos bem como com ensaios experimentais. No respeitante aos últimos, e em termos de ensaios de campo, foram testadas, na Itália central e para os dias mais quentes de Julho e Agosto, duas paredes, uma sem barreira de baixa emissividade na caixa de ar e outra com esse isolamento térmico instalado (Figura 4.38).

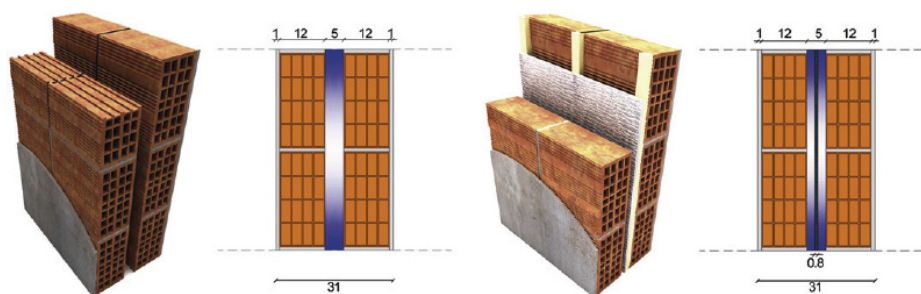


Figura 4.38
PAREDES DUPLAS COM CAIXA DE AR, COM E SEM BARREIRA DE BAIXA EMISSIVIDADE,
ENSAIADAS EM LABORATÓRIO POR BALDINELLI
(Baldinelli, 2010)

Estas paredes fizeram parte de uma das fachadas de uma célula de ensaio de dimensões 3 m x 3 m x 3,08 m, fachada essa móvel que permitiu a substituição da tipologia da parede por outra e que foi instrumentada com termopares e fluxímetros. As restantes três fachadas eram fixas e devidamente isoladas termicamente.

Foi referido que diferentes métodos têm sido propostos para caracterizar o desempenho de *barreiras radiantes* e respetivos espaços de ar, mas continua a faltar uma norma Internacional que defina essa metodologia, sendo tal prova das dificuldades inerentes a este desígnio. Em relação às metodologias existentes, Baldinelli (2010) separou as que caracterizam as propriedades das *barreiras radiantes* em regime estático das em regime dinâmico. Para as primeiras referenciou o uso de métodos como o da placa quente com guarda e pelo método do fluxímetro de calor (EN 12667 *cit. in* Baldinelli, 2010) para inicialmente caracterizar a parede sem ter em conta o efeito da baixa emissividade da barreira. Para posteriormente ter em conta o efeito dessa barreira, e respetivos espaços

de ar onde está aplicada, apontou-se o uso de norma Internacional que define um processo teórico para avaliar a resistência térmica de espaços de ar não ventilados, tendo em conta um coeficiente h_a correspondente à condução e à convecção e um h_r respeitante à radiação, sendo que este último assume que o fator de vista entre as duas superfícies é igual a 1 (ISO 6946 *cit. in* Baldinelli, 2010). Foi referido que o ponto fraco deste método tem a ver principalmente com a dificuldade em definir com rigor as propriedades espectrais dos materiais, até porque poucos laboratórios estão envolvidos na determinação rigorosa das emissividades dos mesmos.

Evidencia-se que, por exemplo, a consideração do valor 0,09 e não 0,06 para a emissividade total de uma barreira radiante origina uma variação na resistência térmica total da parede de 10%. Também foi referido que, estando a caracterização da transferência de calor por radiação efetuada, é possível comparar os resultados da ISO 6946, que considera invariabilidade dos resultados com o aumento da diferença de temperatura entre as superfícies da caixa-de-ar da parede, com a de outra norma internacional que tem por objetivo avaliar o desempenho térmico de janelas, portas e dispositivos de sombreamento (ISO 15099 *cit. in* Baldinelli, 2010) que considera que as trocas por convecção são incrementadas com o aumento dessa diferença de temperatura. Os resultados dessa comparação permitiram concluir que para soluções com aplicação de barreira com emissividade de 0,06 e com diferenças de temperatura entre as superfícies da caixa-de-ar que não ultrapassem 5°C, as diferenças dos resultados da resistência térmica total foram inferiores a 6%, permitindo tal aceitar, nestas situações, a metodologia da ISO 6946.

Ainda dentro dos métodos que caracterizam as propriedades em regime estático foi focada a utilização dos métodos da caixa quente que podem ser o da caixa quente calibrada e o da caixa quente guardada (ISO 8990 *cit. in* Baldinelli, 2010). Uma das vantagens destes métodos é que prescinde da avaliação da emissividade da barreira. Na Figura 4.39 mostra-se o uso do dispositivo da caixa quente para a avaliação da resistência térmica de painéis de baixa emissividade.



Figura 4.39
DISPOSITIVO DA CAIXA QUENTE PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DE
PAINÉIS DE BAIXA EMISSIVIDADE
(Baldinelli, 2010)

Já no respeitante à avaliação do desempenho das *barreiras radiantes* em regime dinâmico, podem ser usados tanto modelos teóricos como experimentais. Em relação a modelos teóricos, caso as várias camadas sejam homogêneas e paralelas e as condições de fronteira possam ser representadas por funções periódicas, pode-se usar o método harmónico descrito na norma internacional ISO 13786 (*cit. in* Baldinelli, 2010).

Outro método teórico que se pode usar é o dos fatores de resposta e fatores de transferência por condução que permitem que as condições de fronteira possam ser consideradas periódicas e lineares, sendo que o autor da presente Tese de Doutoramento evidencia que a norma ASTM C1340/C1340M (ASTM, 2010) usa exatamente esta metodologia no desenvolvimento do correspondente programa informático de avaliação do desempenho das *barreiras radiantes*. Finalmente, é ainda referenciado o uso de métodos CFD, computação dinâmica de fluidos, para o almejar dos mesmos objetivos de realização de simulação dinâmica.

Em relação aos modelos experimentais, estes podem ser efetuados usando duas células de constituição o mais similar possível e dispostas nas proximidades, de forma a ficarem sujeitas às mesmas condições ambientais externas, em que se testa numa a colocação de barreiras de baixa emissividade em uma ou mais paredes e na outra a não existência desse isolamento. A complexidade desta metodologia está, no entanto, na garantia que as células sejam exatamente iguais, para que a diferença de resultados possa ser atribuído exclusivamente ao desempenho da barreira testada. De forma a evitar estes problemas uma outra metodologia pode ser empreendida e que consiste em

usar a mesma célula em que uma parede é amovível podendo assim ser testadas varias situações.

A resistência térmica proveniente de medições “in situ” pode ser calculada pela utilização da norma internacional ISO 9869 (*cit. in* Baldinelli, 2010). Caso se consiga atingir um regime estacionário adequado pode usar-se a metodologia prevista na ISO 9869, no entanto tal será sempre complicado pois a referida norma impõe um tempo mínimo de medição em condições estacionárias de pelo menos 72h, sendo pois esta situação mais vocacionada para ensaios em laboratório em condições ambientais controladas. Para ensaios em condições de regime estacionário chegaram-se aos seguintes resultados para a resistência térmica da parede da Figura 4.38, que integra o uso de barreira radiante (Quadro 4.10).

Quadro 4.10
RESISTÊNCIAS TÉRMICAS DA PAREDE COM BARREIRA DE BAIXA EMISSIVIDADE
CALCULADAS ATRAVÉS DE VÁRIOS MÉTODOS EM REGIME ESTACIONÁRIO
(Baldinelli, 2010)

Método	Resistência Térmica (m ² °C/W)	Incerteza (m ² °C/W)
ISO 9869	1,400	± 0,140
ISO 6946	1,482	± 0,158
Placa quente com guarda	1,570	± 0,020
Caixa quente	1,528	± 0,098

Já no que diz respeito à avaliação do desempenho da parede com barreiras de baixa emissividade, em regime dinâmico, Baldinelli (2010) efetuou a comparação dos valores dos fluxos de calor obtidos por diversos métodos, como foi o caso de métodos experimentais e métodos CFD, constatando-se a grande proximidade de valores entre estes dois.

Cozza et al. (2015) desenvolveram um estudo cujo objetivo é a adoção de cores escuras nos edifícios que usam pigmentos especiais que provocam uma maior reflexão à radiação infravermelha, permitindo, assim, a adoção de uma maior gama de cores no revestimento dos edifícios. O estudo indicou que se pode passar se uma refletância solar

de 5% no caso de tintas escuros tradicionais para 30% no caso de tintas especiais refletantes.

Já em 2016 foi publicado novo estudo sobre pinturas refletantes (Zinzi, 2016), que incorporam pigmentos especiais (*cool pigments*), neste caso especificamente para fachadas. Neste estudo foram medidas a refletância e as emissividades das várias tintas, sendo que os resultados dependeram fortemente da cor de base. Foi desenvolvida uma análise numérica para avaliar o impacto destas pinturas refletantes em edifícios residenciais típicos Italianos, chegando-se a resultados de poupanças de energia para arrefecimento entre 10 e 20% e de poupanças de energia totais até 5%. Em edifícios em regime livre (não climatizados), o uso das tintas refletantes provocou uma diminuição da temperatura operativa interior entre 0,5 e 1,6°C, de acordo com o nível de isolamento e características climáticas. Em relação às temperaturas superficiais exteriores das fachadas existiram reduções acima dos 6 °C durante as horas de pico da radiação solar.

4.9 OUTROS ESTUDOS

Černe e Medved (2005) realizaram um estudo na Eslovénia cujo objetivo foi a determinação, pela análise dinâmica, do desempenho, em edifícios, de elementos leves integrando *barreiras radiantes* com ventilação forçada de cavidades, concluindo-se que o facto de se ventilar as cavidades não trouxe significativas diminuições dos consumos energéticos.

Ahmad, I. (2010) realizou no Paquistão um estudo que teve como objetivo a avaliação do desempenho de isolamentos refletantes em coberturas, em período tanto de verão como de inverno, tendo realizado uma análise de custo/benefício tendo chegado a um período de amortização de somente 9 meses e a uma poupança de CO₂ entre 3 a 4 toneladas anuais.

Zhijian K. (2006) em Singapura realizou um estudo com o objetivo de analisar a poupança de energia numa sala climatizada pela aplicação de *barreiras radiantes* tendo obtido valores de até 14% para o aquecimento e até 19,6% para o arrefecimento.

Em 2006 o organismo de certificação Britânico BM Trada concede um certificado a um isolamento térmico para coberturas, constituído por várias folhas refletantes dispostas em série e separadas entre si por folhas de polietileno expandido, numa espessura total de 3 cm, designado por TRISO SUPER 10[®] da empresa ACTIS SA com sede em Limoux, França, especificando que se o produto for aplicado de acordo com as recomendações do fabricante, o seu desempenho térmico é equivalente a 21 cm de espessura de lã mineral (BM Trada. [Em linha]. Disponível em <http://www.just-insulation.com/pdfs/multifoil/actis/BM_Trada.pdf>). A mesma empresa ACTIS, em 2006, realizou uma queixa judicial contra o Department for Communities and Local Government da Inglaterra e Escócia pelo facto de na edição de 2006 do Regulamento que trata das convenções para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica (BR 443, 2006) ter referido a solução do uso do método da caixa quente (que segundo a ATICS prejudica o resultado do desempenho dos isolamentos refletantes) para a avaliação do desempenho dos isolamentos térmicos refletantes multi-folhas, sendo que, em consequência, a autoridade local para o controlo dos edifícios (LABC) emitiu uma nota de orientação indicando que o desempenho daquele tipo de isolamentos só podia ser avaliado através do ensaio da caixa quente. Em 2007 é proferida a sentença do Tribunal dando razão à ACTIS, que, entre outras deliberações, refere que a regra em causa da BR 443 é considerada inaplicável (Supreme Court of England and Wales, 2007). De referir que a empresa ACTIS realiza ela própria ensaios “in situ” utilizando casas modelo que construiu para o efeito em Limoux, França, chegando a resultados substancialmente mais satisfatórios para o valor do coeficiente de transmissão térmica (U) do que os obtidos com o método da caixa quente.

No seguimento desta controvérsia, em 2007 é publicado pelo Laboratório Nacional de Física do Reino Unido um relatório decorrente do estudo sobre o desempenho de vários tipos de isolamentos térmicos em coberturas (Williams e Ballard, 2007) em que se insistiu na defesa do uso da caixa quente para a avaliação do desempenho dos isolamentos refletantes.

Em 2009, o Departamento Governamental Britânico, alvo da queixa judicial anteriormente referida realiza uma publicação, baseada em recolha de opiniões de vários técnicos, sobre a determinação do desempenho térmico dos isolamentos refletantes multi-folha, apresentando as seguintes conclusões (Eames, 2009):

- Os métodos internacionalmente aceites para determinar o desempenho térmico de materiais e componentes da construção de edifícios são baseados nas conhecidas técnicas do prato quente e da caixa quente guardada, que permitem a obtenção de valores precisos e repetíveis;
- As opiniões técnicas recolhidas dividiram-se em duas categorias, aquelas que apontam que os métodos standard do BR443 são apropriados e aquelas que referiram que outros métodos de testar estes materiais de isolamento devem ser considerados, com relevância para os testes *in situ*. Estas últimas opiniões baseiam-se em vários relatórios que apontam que o desempenho destes isolamentos dão resultados substancialmente mais favoráveis nos testes *in situ*. Eames (2009) aponta que caso se consiga com a metodologia dos testes *in situ* obter resultados robustos que sejam repetíveis e caso se consiga uma aprovação Europeia ou outra reconhecida aprovação internacional então poderá esta metodologia ser igualmente utilizada tal e qual os métodos correntes. No entanto Eames (2009) aponta que até à data não existem substantivas evidências de robustez, precisão e reprodutibilidade para suportar a substituição da caracterização através da caixa quente guardada para os testes *in situ*;
- Um modelo desenvolvido para prever o comportamento destes materiais de isolamento indicam que caso tenham 19 camadas com emissividades superficiais das folhas de 0,02 com isolamento resistivo no seu interior com condutibilidade térmica equivalente ao aerogel ($0,012 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$) não obtêm um valor de U mais baixo que 20 cm de lã mineral.

De forma a resolver-se a nível científico esta questão e com o objetivo de ser possível definir normas de ensaio *in-situ* para avaliação do desempenho térmico dos materiais de construção foi desenvolvido em 2009 a nível do CEN/TC89 um grupo de trabalho designado por WG13 (Desempenho Térmico *In-Situ* de Materiais, Elementos e Estruturas) cuja primeira reunião foi realizada em 29 de Janeiro de 2010. A par deste grupo existe, no âmbito do CEN/TC89, um outro grupo, o WG 12 (Isolamentos Refletantes), de cujo trabalho derivou a norma EN16012 - Isolamentos Térmicos para Edifícios – Produtos de isolamento refletante – Determinação do desempenho térmico declarado (CEN, 2012), que tipificou os isolamentos refletantes e definiu os métodos de ensaio para a verificação do seu desempenho, que ainda não incorporam as citadas metodologias de ensaio *in-situ*. Esperam-se pois resultados do grupo de trabalho 13 que é constituído por uma série de especialistas provenientes dos mais variados setores como sejam as Universidades, Laboratórios, Empresas de produção de isolamentos

refletantes, empresas de produção de isolamentos resistivos bem como de consultores independentes, que à data ainda não chegaram a um consenso que permita a produção de uma hipotética norma sobre testes *in situ*.

Na sequência, o BBA (2010) publicou um boletim informativo, que abordou as convenções e metodologias para o cálculo do U de isolamentos refletantes, sendo que foi realçado que todos os cálculos foram realizados tendo em conta os princípios e os valores das condutividades térmicas dadas pela BR 443:2006. No anexo deste boletim da BBA são apresentados exemplos de cálculo de Us de elementos construtivos contendo isolamentos refletantes multi-folha. Em complemento o BBA (2012) publicou um boletim informativo sobre metodologias de teste do desempenho térmico de isolamentos refletante como o multi-folha e o bolha-folha, onde se reafirmou que os únicos métodos usados pelo BBA são os nacional e internacionalmente aceites, como é o caso da BR 443:2006 ou da BS EN 16012. No entanto o BBA (2012) referiu que está atento e colaborante (inclusivamente o presidente do WG 13, Jon Denyer, é um membro do BBA) no respeitante ao desenvolvimentos dos trabalhos do WG13 do CEN/TC89 de forma a desenvolverem-me métodos de análise do desempenho térmico complementares aos existentes, nomeadamente os possíveis testes *in situ*. No entanto é enfatizado que até à data não se chegou a qualquer consenso sobre o tema. Efetivamente, à data da redação desta Tese de Doutoramento, ainda tal acordo não foi possível, estando os membros do WG profundamente divididos.

Na sequência do último encontro do CN/TC 89 em Edimburgo, Escócia foi lavrado o habitual relatório sobre os trabalhos desenvolvidos nas várias reuniões (CEN/TC 89, 2016), sendo que no respeitante ao WG13 o presidente Jon Denyer escreveu que perduram significativas diferenças de opinião no seio do grupo entre aqueles que acreditam que o valor de cálculo da resistência térmica (R) dos isolamentos, nomeadamente os refletantes, aplicados num elemento de construção podem derivar de testes *in situ* e aqueles que não acreditam em tal. Ambos os lados submeteram evidências do que defendem ao Centro Comum de Investigação (JRC - *Joint Research Centre*), que é o serviço de ciência e conhecimento da Comissão Europeia, que como parte neutra neste diferendo avaliará a situação, sendo que o relatório de resposta está previsto para Abril de 2017. No mesmo relatório (CEN/TC 89, 2016) a Presidente Carol Houghton do WG12 vocacionado especificamente para produtos de isolamento

refletante refere que é necessário realizar uma revisão da norma EN 16012 (CEN, 2012) devido a possíveis más interpretações da aplicação da que está em vigor.

Guo et al. (2012) realizaram em Hangzhou - China um estudo sobre a poupança de energia derivada da aplicação de revestimentos refletantes em edifícios localizados em zonas com verões quentes e invernos frios, como é o caso de Zhejiang – Hangzhou. Foram utilizadas neste estudo duas células de ensaio, uma com revestimento refletante e outra sem esse revestimento, sujeitas tanto às condições climáticas do verão como do inverno. Os resultados indicaram que o revestimento refletante permitiu reduzir entre 8 e 10°C a máxima temperatura atingida na superfície exterior da parede. Através de cálculos efetuados, chegou-se à conclusão de que a aplicação de revestimentos refletantes na célula respetiva provocaram uma poupança de eletricidade com a climatização para arrefecimento de cerca de 5,8 kWh/(m². mês).

Arumugam et al. (2015) realizaram um estudo aplicado a cinco zonas climáticas da Índia sobre a otimização do isolamento de coberturas pela utilização de revestimentos com elevado albedo (elevada refletância) e de *barreiras radiantes*. Para tal simularam numericamente um edifício de serviços com 200 m² usando para tal o programa informático Energyplus v.7.0. Para cada zona climática foram estudados diferentes tipos de coberturas e foi realizada uma análise económica utilizando o conceito de período de retorno simples. Usando em coberturas revestimentos com elevado albedo bem como *barreiras radiantes* as necessidades de isolamento convencional diminuem nas 5 zonas climáticas. Foi constatado que os benefícios na poupança de energia diminuem por adicionar isolamento convencional acima de certos limites. Para uma cobertura com albedo de 0,6 e barreira radiante com emissividade igual a 0,2 os benefícios económicos cessam com uma resistência térmica combinada de 0,49 m²°C/W em climas quentes e húmidos e de 1,02 m²°C/W em climas frios. Concluíram, ainda, que em climas frios, caso a cobertura possua *barreiras radiantes* e revestimentos com elevado albedo, que o usar isolamento convencional para além dos 25 mm, não provoca benefícios financeiros em termos de economia de energia.

Para concluir este capítulo cita-se um estudo de 2016, oriundo da Malásia, que teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica relacionada com investigação no domínio das *barreiras radiantes* (Lee et al., 2016), chegando à conclusão que os

investigadores em geral obtiveram, na estação de arrefecimento, para barreiras radiantes instaladas em coberturas valores de redução do fluxo de calor entre 26 e 50% e reduções de consumo de energia entre 6 e 16%. Em contraste, durante o inverno, a diminuição de fluxo pode oscilar entre 7 e 13% e em alguns cenários o uso de barreiras radiantes pode mesmo aumentar o fluxo de calor, aumentando os consumos de energia para aquecimento. No verão com a redução do fluxo de calor, a temperatura do ar do desvão de cobertura é menor entre 4 e 10°C e a temperatura superficial exterior da cobertura aumenta entre 1 e 3°C. Também foi referido que muitos investigadores realizaram análises paramétricas para determinar quais os parâmetros que influenciam mais o desempenho térmico das barreiras radiantes, sendo que além do clima apontaram a emissividade da barreira radiante e a localização das condutas de climatização. Registou-se que todos os investigadores concordam que as barreiras radiantes são efetivas na redução dos fluxos de calor na estação de verão mas a magnitude apontada dessa redução é que é alvo de diferenças, sendo que as razões para tal serão as diferentes condições climáticas, as diferentes emissividades da superfície da barreira, o método de ensaio empreendido, o tamanho, forma e taxa de ventilação do desvão de cobertura, o método da instalação da barreira radiante, entre outros.

CAPÍTULO V

DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO E DA METODOLOGIA DE ENSAIO

5.1 DESCRIÇÃO GERAL DO CASO DE ESTUDO

O caso de estudo objeto de análise no verão de 2010 foi o de um corpo este, pertencente a uma moradia unifamiliar, designada por “casa da mina” situada na cidade da Maia, distrito do Porto. Essa parte é constituída por um desvão de cobertura e pelo quarto que se situa imediatamente por baixo. Na Figura 5.1 apresenta-se a planta do 1º andar, cotada em m, em que se verifica que este piso é parcialmente ocupado por um quarto, que apresenta desconforto térmico por sobreaquecimento em dias em que a temperatura exterior bem como a radiação solar apresentam valores elevados.

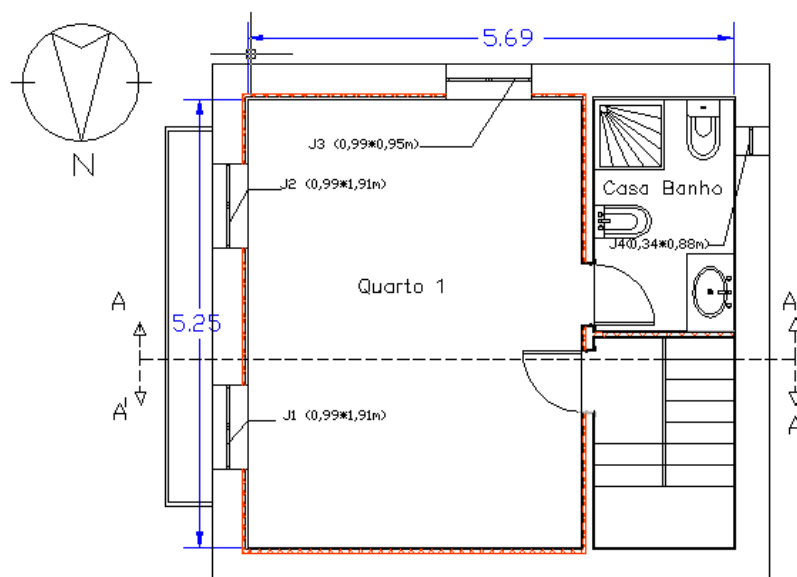


Figura 5.1
PLANTA DO 1º ANDAR DA PARTE ESTE EM ESTUDO

Na Figura 5.2 apresenta-se a planta do desvão de cobertura, cotada em m, situada imediatamente acima do piso do 1º andar anteriormente apresentado:

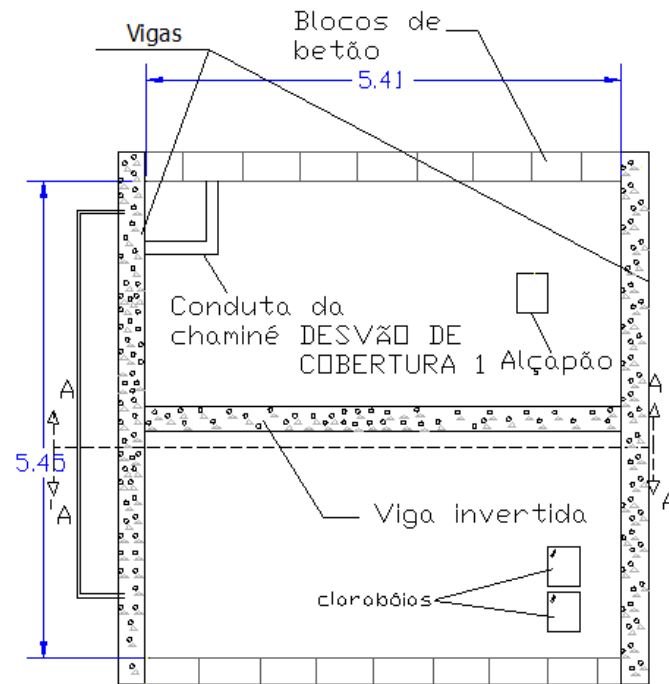


Figura 5.2
PLANTA DO DESVÃO DE COBERTURA DA PARTE ESTE EM ESTUDO

Na Figura 5.3 apresenta-se a planta da cobertura da parte do corpo em estudo da moradia unifamiliar. Esta cobertura é constituída por uma estrutura de suporte em madeira revestida por telhas cerâmicas do tipo marselha.

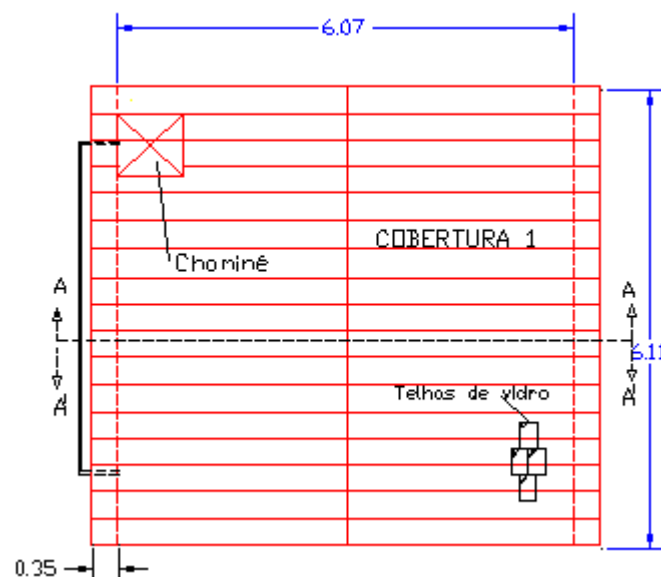


Figura 5.3
PLANTA DA COBERTURA DA PARTE ESTE EM ESTUDO

Na Figura 5.4 apresenta-se o corte A'-A' do corpo em estudo da moradia unifamiliar, com a indicação da constituição dos vários elementos construtivos relevantes. Evidencia-se que o facto da envolvente do quarto ser isolada termicamente pelo interior, tal situação ao condicionar a inércia térmica interior, vai influenciar o conforto térmico desse compartimento.

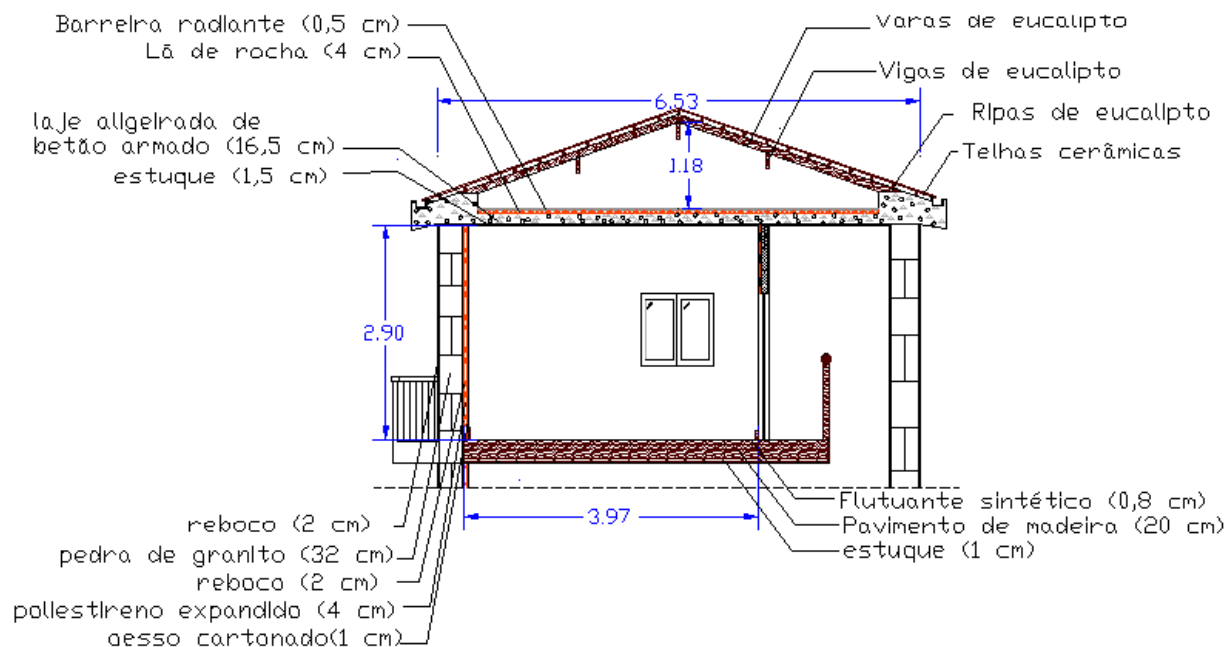


Figura 5.4
CORTE A'-A' DA PARTE ESTE EM ESTUDO

Na Figura 5.5 apresenta-se uma imagem da parte este considerada da moradia para o estudo objeto do presente trabalho.



Figura 5.5
FACHADA ESTE DO CORPO DA MORADIA OBJETO DE ESTUDO

No Verão de 2010 utilizou-se exclusivamente esta parte da moradia, sendo que no de 2011, e com o intuito de comparar duas coberturas semelhantes com diferentes soluções de isolamento, também se utilizou uma outra parte da moradia cuja planta do 1º andar, cotada em metros, se apresenta na Figura 5.6.

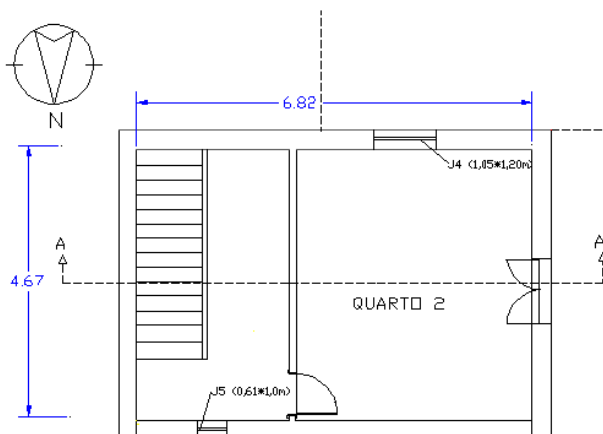


Figura 5.6
PLANTA DO 1º ANDAR DA PARTE OESTE EM ESTUDO

Na Figura 5.7 apresenta-se, também cotada em metros, a correspondente planta do desvão da cobertura e a planta da cobertura da mesma parte oeste da moradia em estudo.

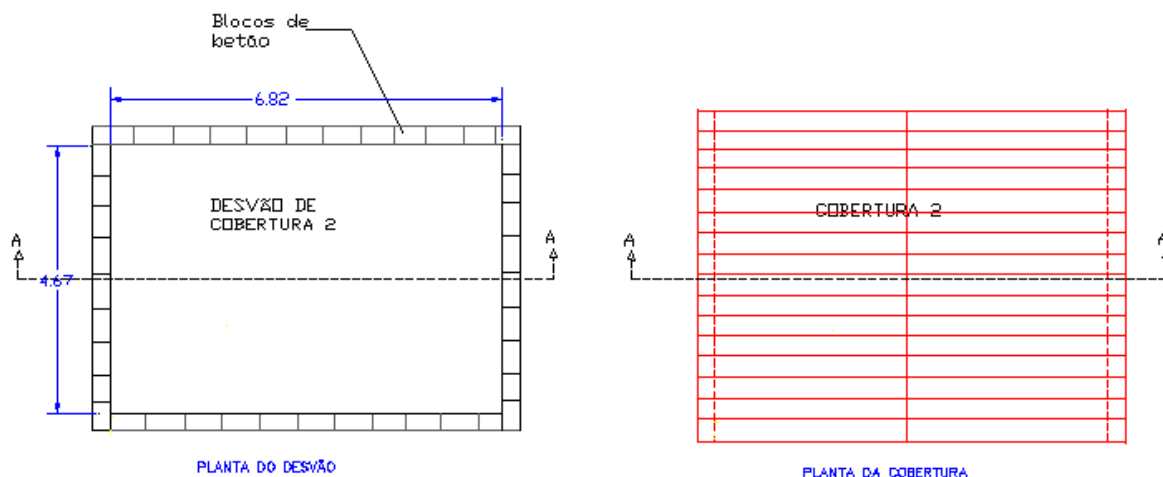


Figura 5.7
PLANTAS DO DESVÃO DA COBERTURA E DA COBERTURA DA PARTE OESTE EM ESTUDO

É relevante referir que, ao contrário do que seria desejável para o estudo comparativo ter o maior rigor possível, as duas coberturas, este e oeste, não têm exatamente as mesmas dimensões. A este possui dimensões interiores em planta de 5,45 m x 5,41 m, enquanto a oeste de 6,82 m x 4,67 m. Quanto ao pé-direito interior na zona da cumeeira, já os respetivos

valores são praticamente iguais, 1,18 m na cobertura este e 1,16 m na cobertura oeste. Deste modo, em termos de volume interior, o desvão de cobertura este tem $17,40 \text{ m}^3$ e o desvão de cobertura oeste tem $18,47 \text{ m}^3$, ou seja, o último tem mais 6% de volume do que o primeiro.

Na Figura 5.8 apresenta-se uma imagem da parte oeste considerada da moradia para o estudo objeto do presente trabalho.



Figura 5.8
PARTE OESTE DA MORADIA OBJETO DE ESTUDO

É relevante referir que as frinchas, de dimensão apreciável, existentes entre as telhas, proporcionam condições para que o desvão de cobertura possua franca ventilação. Igualmente é importante evidenciar que os dois quartos utilizados para o estudo apresentam diferenças a nível dos envidraçados, nomeadamente em termos de número e orientação, situação que obviamente condiciona as características térmicas destes espaços.

5.2 CONSTITUIÇÃO E CARATERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Em termos construtivos, a parte este em estudo da moradia é constituída por uma alvenaria de pedra de granito amarelo de Mondim, revestida exteriormente com reboco tradicional, com excepção da zona dos cunhais, ombreiras, padieiras, peitoris e zona correspondente às lajes. Interiormente é revestida por cerca de 2 cm de espessura de reboco tradicional em cimento

que posteriormente foi sobreposto por um painel composto por 4 cm de poliestireno expandido colado a placas de gesso cartonado com 1 cm de espessura.

Os caixilhos das janelas são em PVC com vidro duplo de 6 mm de espessura pelo exterior e 4 mm pelo interior, sendo que a lâmina de ar entre eles é de 12 mm de espessura. Todas as janelas com exceção da referente à casa de banho possuem portadas interiores em alumínio de área igual à dos vidros, ficando pois encostadas a estes quando fechadas.

A laje de pavimento do quarto é composta por um estrutura de vigas de madeira em castanho e revestimento superior em soalho de pinho, recentemente revestido por pavimento flutuante sintético. Entre o soalho de pinho e o pavimento sintético foi colocado um filme de polietileno expandido. Inferiormemente existe um forro constituído por ripas de madeira, gesso estuque e sisal. Na Figura 5.9 pode ver-se o aspecto do revestimento do pavimento referido.

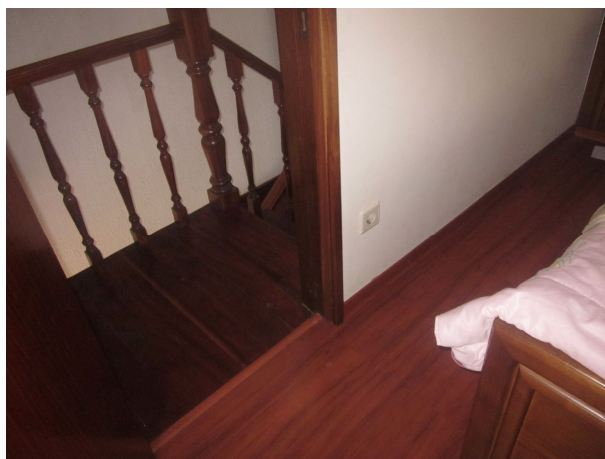


Figura 5.9
PAVIMENTO DO QUARTO ESTE

A laje de esteira, que possui um apoio intermédio materializado por uma viga invertida em betão armado, é constituída por uma laje aligeirada com 16,5 cm de espessura constituída por vigotas de betão pré-esforçado e abobadilha cerâmica, revestidas superiormente por uma rede eletrossoldada e camada de compressão de betão, tudo isolado termicamente a nível superior com manta de lã de rocha de 4 cm de espessura, posteriormente revestida por um isolamento térmico refletante de baixa emissividade (ou barreira radiante) de 0,5 cm de espessura, constituída por uma “sandwich” de duas folhas de alumínio termolaminado com espuma de polietileno não reticulado de baixa densidade, sendo que o alumínio apresenta uma emissividade total de 0,0629 tanto aos 20°C como aos 30°C.

A cobertura é constituída por duas águas, uma orientada a este e outra a oeste, com estrutura de suporte em madeira constituída por vigas, varas e ripas em eucalipto. O revestimento é executado com telha cerâmica do tipo Marselha. As empenas do desvão de cobertura são constituídas por blocos de betão maciços numa espessura total de 31 cm, revestidos exteriormente por argamassa de cimento na espessura de 2 cm. Na Figura 5.10 pode-se ver o interior do desvão durante a operação de colocação do isolante térmico refletante de baixa emissividade, onde se evidencia o revestimento da laje de esteira com mantas de lã de rocha de 4 cm de espessura, a estrutura em madeira da cobertura revestida com telha cerâmica do tipo Marselha e uma das empenas (orientada a norte) constituída por blocos de betão maciços.



Figura 5.10
INTERIOR DO DESVÃO DE COBERTURA ESTE, DURANTE A COLOCAÇÃO DO ISOLAMENTO
TÉRMICO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE

No respeitante à cobertura oeste, usada em 2011, a diferença para a cobertura este é que integra isolamento térmico XPS de espessura de 4 cm por cima da laje de esteira e não lã de rocha como na cobertura este, e não lhe foi aplicado o isolante térmico refletante de baixa emissividade. Na Figura 5.11 apresenta-se uma imagem do interior do desvão de cobertura oeste, onde se evidencia o isolamento térmico com placas de XPS, completamente cobertas por pó.



Figura 5.11
INTERIOR DO DESVÃO DE COBERTURA OESTE

No respeitante às características térmicas dos elementos construtivos relevantes para este estudo, considerou-se o seguinte tendo em conta os dados do ITE 50 do LNEC (Santos e Matias, 2006) bem como os documentos de homologação dos vários materiais:

- Para a laje de esteira com lã de rocha e isolamento térmico refletante de baixa emissividade apresenta-se no Quadro 5.1 as características térmicas resistivas dos vários elementos constituintes;

Quadro 5.1
CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DA LAJE DE ESTEIRA

Elementos constituintes	λ (W/(m°C))	e (m)	R (m ² °C/W)
PEF do isolamento térmico refletante de baixa emissividade	0,038	0,005	0,13
Lã de rocha	0,04	0,04	1
Laje aligeirada de betão		0,165	0,13
Estuque	0,4	0,015	0,04

Para a situação da laje de esteira da cobertura a oeste, a diferença reside no facto que o PEF e a lã de rocha não existem, sendo substituídos por placas de XPS de 4 cm de espessura com λ igual a 0,037 W/(m°C).

- Para a cobertura de telha Marselha, esta é o único material constituinte, tendo uma espessura de 1 cm e um coeficiente de condutibilidade térmica (λ) igual a 0,69 W/(m°C).

- Para a parede de fachada, apresenta-se no Quadro 5.2 as características térmicas resistivas dos vários elementos constituintes;

Quadro 5.2
CARATERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DA FACHADA

Elementos constituintes	λ (W/(m°C))	e (m)	R (m ² °C/W)
Reboco tradicional em cimento	1,3	0,02	0,02
Pedra de granito	2,8	0,32	0,11
Reboco tradicional em cimento	1,3	0,02	0,02
EPS	0,042	0,04	0,95
Gesso cartonado	0,25	0,01	0,04

- Para a parede de empena em blocos de betão existente nos desvãos de cobertura, apresenta-se no Quadro 5.3 as características térmicas resistivas dos vários elementos constituintes.

Quadro 5.3
CARATERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DAS EMPENAS DOS DESVÃOS DE COBERTURA

Elementos constituintes	λ (W/(m°C))	e (m)	R (m ² °C/W)
Reboco tradicional em cimento	1,3	0,02	0,02
Blocos de betão	2	0,30	0,15

5.3 OBJETIVOS E METODOLOGIA DO ESTUDO

O objetivo deste estudo foi, numa primeira fase, no Verão de 2010, o de comparar o comportamento térmico da parte este referida da moradia unifamiliar com e sem a aplicação de isolante térmico refletante de baixa emissividade. Este isolante, como já foi referido atrás, é constituído por uma “sandwich” de folha de alumínio termolaminado com espuma de polietileno não reticulado de baixa densidade na espessura de 5 mm. Na Figura 5.12

apresenta-se o material em causa aplicado numa maqueta cuja execução teve a coordenação técnica do autor, em que se procura mostrar várias das possibilidades de aplicação deste tipo de isolamento térmico.



Figura 5.12
MAQUETA MOSTRANDO VÁRIAS DAS APLICAÇÕES DO ISOLAMENTO TÉRMICO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE

A razão da opção por esta tipologia de isolamento térmico refletante de baixa emissividade justifica-se não só pelo facto do autor ter possuído a facilidade de obter amostras para ensaio, pela colaboração pontual voluntária que prestou a uma empresa que fabrica este produto, bem como igualmente pela razão de este tipo de material já ter sido no passado ensaiado por Matias (2001) tendo este obtido bons resultados face a outras tipologias de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade. A união dos vários filmes de isolamento térmico refletante de baixa emissividade foi realizada efetuando sobreposições médias de 15 cm usando fita colante de alumínio.

Deste modo, existiu uma primeira fase do ensaio, na segunda metade de Agosto de 2010, em que se monitorizou o comportamento da parte do edifício em estudo sem isolamento térmico refletante de baixa emissividade e uma segunda fase do ensaio, na primeira metade de Setembro de 2010, em que se aplicou, sobre a existente manta de lã de rocha, aquele isolamento. Esta solução, de colocar um isolamento tradicional resistivo, neste caso a lã de rocha, conjuntamente com um isolamento térmico refletante de baixa emissividade, foi aqui

seguida, pois verificou-se que em alguns Países, como é o caso dos EUA e da Austrália, esta é a solução que está a ser recomendada, ou seja a conjugação dos dois tipos de isolamento e não a substituição de um pelo outro. Obviamente que esta constatação não coloca de lado o interesse em testar o uso exclusivo do isolamento térmico refletante de baixa emissividade.

Como foi referido, no Verão de 2011 usaram-se duas coberturas em simultâneo, uma a este com aplicação de isolamento térmico refletante de baixa emissividade e a outra a oeste sem aplicação deste tipo de isolamento.

Na cobertura este foi, numa primeira fase, considerado somente o isolamento térmico refletante de baixa emissividade na esteira e numa segunda fase colocada adicionalmente este isolamento por baixo das vertentes, como se mostra na Figura 5.13.



Figura 5.13
APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO TÉRMICO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE NAS
VERTENTES DA COBERTURA ESTE

5.4 METODOLOGIA DE ENSAIO E EQUIPAMENTOS USADOS

Para a execução dos ensaios *in situ* tanto em 2010 como em 2011 foram usados os seguintes equipamentos:

- Dois Datalogger com 16 canais analógicos e 2 de impulso de frequência, um colocado na cobertura este (Figura 5.14a) e outro, só no Verão de 2011, na cobertura oeste (Figura 5.14b);



Figura 5.14 (a e b)
DATALOGGERS LIGADOS AOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA

Na Figura 5.15b evidencia-se a deposição de pó no XPS decorrente da acumulação respeitante a um período de sensivelmente 5 anos, o que é uma indicação importante para o que acontecerá com certeza no desvão com aplicação do isolamento térmico refletante de baixa emissividade, prejudicando assim a sua emissividade.

- Sensores de temperatura do ar. No Verão de 2010 foram usados 3 sensores de temperatura que já incorporam um logger de memorização de dados. Um no exterior que foi colocado por baixo da cobertura da chaminé do fogão de sala, de modo a estar o mais protegido possível da radiação solar (Figura 5.15a), outro no desvão de cobertura (Figura 5.15b) e um último no quarto (Figura 5.15c);



Figura 5.15 (a a c)
SENSORES DE TEMPERATURA DO AR

Realça-se que estes sensores tanto fazem a medição da temperatura no interior da sua caixa como igualmente o fazem na extremidade de um cabo que se conecta a uma entrada existente

para o efeito, sendo que neste último caso é automaticamente suspensa a primeira medição referida.

- Sensores de temperatura e humidade do ar. No Verão de 2011 foram usados 5 sensores deste tipo, três na zona este da moradia, um no quarto, outro no desvão de cobertura e outro no exterior e dois na zona oeste da mesma, um no quarto e outro no desvão de cobertura. No que concerne ao sensor usado no exterior, desta vez esteve disponível para uso, um invólucro protetor da radiação solar (Figuras 5.16 a e b);



Figura 5.16 (a e b)
INVÓLUCRO PROTETOR DA RADIAÇÃO SOLAR PARA SENSOR DE TEMPERATURA E HUMIDADE
COLOCADO NO EXTERIOR

- Termopares tipo T (Figura 5.17), constituídos por fios em que o positivo, sob o ponto de vista eléctrico, é em cobre e o negativo é constituído por uma liga de cobre e níquel na proporção de 45 a 60% de cobre, para medição da temperatura superficial de alguns elementos construtivos. Este tipo de termopares apresenta uma precisão típica de diferenças máximas de 0,5°C em relação ao valor real (Winiarski e O'Neal, 1996);

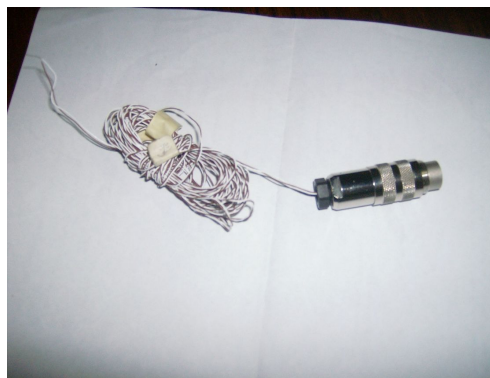


Figura 5.17
TERMOPAR TIPO T

Para a ligação dos termopares tipo T ao datalogger, escolheu-se um canal analógico já pré-definido, o sensor de temperatura TT_400C. No Verão de 2010 foram usados 5 termopares. Dois deles foram usados para medir a temperatura da superfície inferior das telhas, um aplicado na vertente este do lado norte e outro na vertente oeste do lado sul (Figura 5.18), sendo que estas vertentes constituem o teto do desvão.



Figura 5.18
TERMOPAR TIPO T APLICADO NAS TELHAS DA COBERTURA

Outros dois termopares tipo T foram usados para medir a temperatura da superfície superior da laje de esteira, um do lado norte e outro do lado sul, sendo que numa primeira fase foram aplicados na manta de lã de rocha (Figura 5.19) e numa segunda fase no isolamento térmico refletante de baixa emissividade que entretanto foi aplicada por cima daquela.

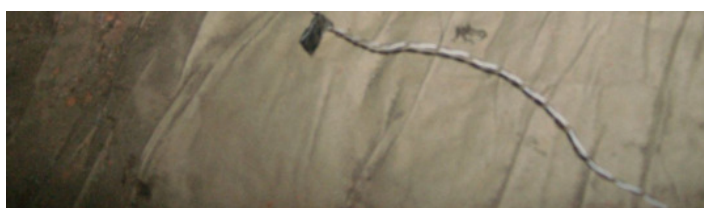


Figura 5.19
TERMOPAR TIPO T APLICADO NA SUPERFÍCIE SUPERIOR DA LAJE DE ESTEIRA SOBRE A
MANTA DE LÃ DE ROCHA

Um último termopar tipo T foi aplicado na superfície inferior da mesma laje de esteira de modo a medir-se a temperatura superficial do teto do quarto que se encontra por debaixo do desvão (Figura 5.20).

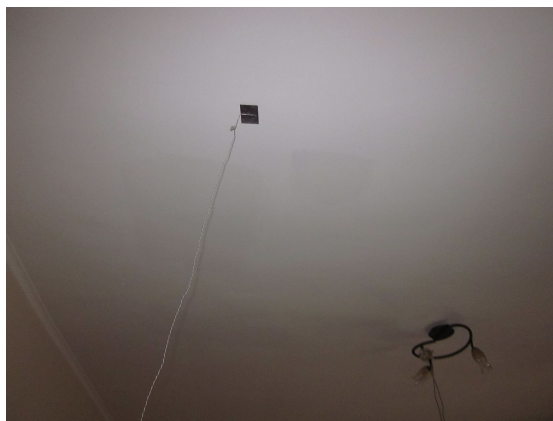


Figura 5.20

TERMOPAR TIPO T APLICADO NA SUPERFÍCIE INFERIOR DA LAJE DE ESTEIRA

Já no Verão de 2011, foram usados no total sete termopares para medição de temperatura superficial, sendo que quatro foram usados na zona este da moradia e três na zona oeste. No respeitante à zona este foram aplicados termopares no teto do quarto, na superfície superior da laje de esteira, nomeadamente por cima do isolamento térmico refletante de baixa emissividade, na superfície inferior das telhas e na superfície inferior do isolamento térmico refletante de baixa emissividade, colocado por baixo das vertentes (Figura 5.21).

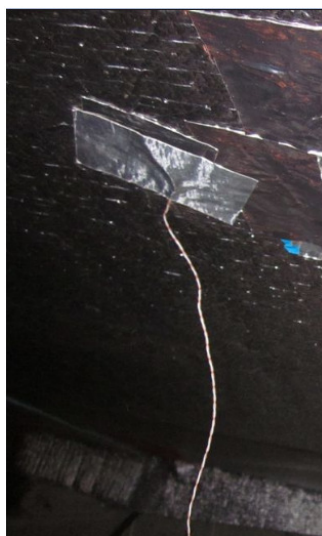


Figura 5.21

TERMOPAR TIPO T APLICADO NA SUPERFÍCIE INFERIOR DO ISOLAMENTO TÉRMICO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE SOB AS VERTENTES DA COBERTURA

No respeitante à zona oeste foram aplicados um termopar no teto do quarto, outro na superfície superior da laje de esteira por cima do XPS (Figura 5.22) e outro na superfície inferior das telhas.



Figura 5.22
TERMOPAR TIPO T APLICADO NA SUPERFÍCIE SUPERIOR DO XPS

- Termofluxímetros constituídos em poliuretano, para no Verão de 2010 efetuar a medição do fluxo de calor que passa tanto pela cobertura (Figura 5.23) como pela laje de esteira, sendo que neste caso existiram duas fases; a primeira com lã de rocha (Figura 5.24) e a segunda com isolamento térmico refletante de baixa emissividade sobre aquela. Estes termofluxímetros funcionam para uma temperatura máxima de 90°C. Para a ligação ao datalogger e escolha do tipo de canal, sensor e escala teve-se em consideração a sensibilidade (valor da calibração) fornecida pelo fabricante a 20°C que é de 17 W/m²/mV. Escolheu-se assim no datalogger um canal analógico, o sensor de Voltagem U_100mV e fixando-se em termos de escala para $x_1 = 0$ mV o valor de $y_1 = 0$ W/m² e para $x_2 = 100$ mV o valor de $y_2 = 1700$ W/m². Os termofluxímetros medem o fluxo de calor pelo princípio da proporcionalidade em relação à diferença de temperatura atingida nas suas duas faces (Santos *cit. In* Matias, 2001);



Figura 5.23
TERMOFLUXÍMETRO APLICADO NA SUPERFÍCIE INFERIOR DAS TELHAS DE COBERTURA



Figura 5.24
TERMOFLUXÍMETRO APLICADO NA SUPERFÍCIE SUPERIOR DA LAJE DE ESTEIRA SOBRE A
MANTA DE LÃ DE ROCHA

Já em 2011 usaram-se cinco termofluxímetros, três na zona este e dois na zona oeste. Quanto à zona este aplicou-se um por cima da laje de esteira, outro na superfície inferior da telha e outro na superfície inferior do isolamento térmico refletante de baixa emissividade sob as vertentes (Figura 5.25 a e b).

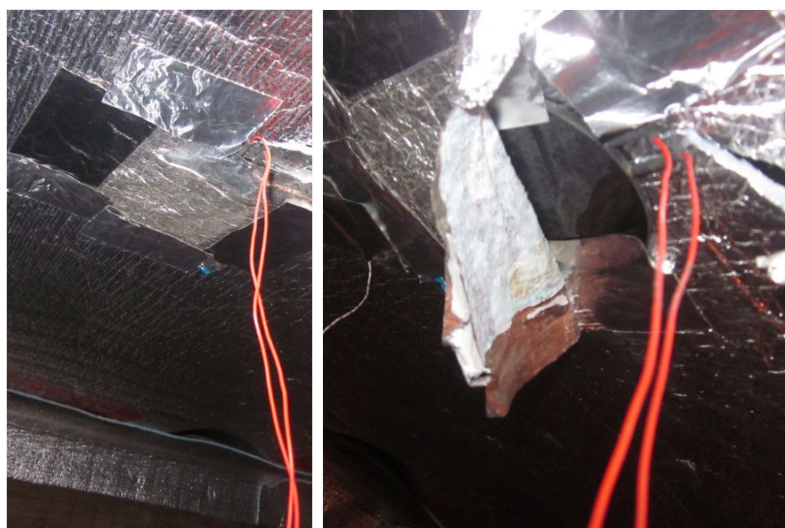


Figura 5.25 (a e b)
TERMOFLUXÍMETRO APLICADO NA SUPERFÍCIE INFERIOR DA ISOLAMENTO TÉRMICO
REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE SOB AS VERTENTES

Quanto à zona oeste foi aplicado um termofluxímetro na superfície superior do XPS (Figura 5.26) e outro na superfície inferior das telhas.

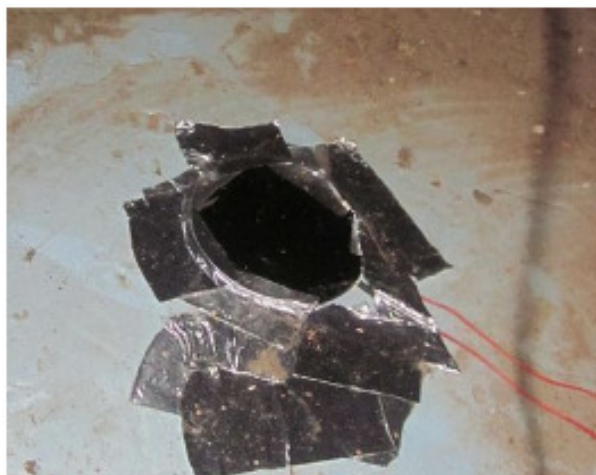


Figura 5.26
TERMOFLUXÍMETRO APLICADO NA SUPERFÍCIE SUPERIOR DO XPS

Ainda em 2011 e como estudo complementar usou-se mais um termofluxímetro, por baixo de um conjunto de embalagens de cartão para alimentos líquidos (Figura 5.27) de forma a se poder tirar uma conclusão preliminar sobre o possível uso destas embalagens como material de isolamento térmico.



Figura 5.27
TERMOFLUXÍMETRO APLICADO SOB EMBALAGENS DE CARTÃO PARA ALIMENTOS LÍQUIDOS

- Termómetro de bolbo negro (Figura 5.28). Este equipamento tem como objetivo obter a designada temperatura média radiante que mais não é do que a temperatura superficial da envolvente, considerada uniforme, de um compartimento virtual em que as trocas de calor por radiação são iguais às verificadas no espaço real. A temperatura média radiante permite pois calcular as trocas de calor desenvolvidas entre o corpo humano e as superfícies que o envolvem. Este equipamento foi usado no Verão de 2011 para medir a temperatura radiante do desvão de cobertura este;



Figura 5.28
TERMÓMETRO DE BOLBO NEGRO

- Piranómetro para medição da radiação solar total na horizontal (Figura 5.29). Este piranómetro consegue medir fluxos até 2000 W/m^2 e funciona entre os -30°C e os 70°C . Para a ligação ao datalogger e escolha do tipo de canal, sensor e escala teve-se em consideração a sensibilidade do piranómetro fornecida pelo fabricante que é de $74 \mu\text{V/Wm}^{-2}$. Escolheu-se assim no datalogger um canal analógico, o sensor de Voltagem U_100mV e fixando-se em termos de escala para $x_1 = 0 \text{ mV}$ o valor de $y_1 = 0 \text{ W/m}^2$ e para $x_2 = 100 \text{ mV}$ o valor de $y_2 = 1351 \text{ W/m}^2$;



Figura 5.29
PIRANÓMETRO

- Anemómetro e cata-vento modelo combinado (Figura 5.30). Este equipamento, que foi usado no Verão de 2010, funciona entre os -30°C e os 60°C ;



Figura 5.30
ANEMÓMETRO E CATA-VENTO

Para a ligação do cata-vento ao datalogger e escolha do tipo de canal, sensor e escala teve-se em consideração a respectiva sensibilidade fornecida pelo fabricante que é de $0,31\text{V} = 22,5^\circ$. Escolheu-se assim no datalogger um canal analógico, o sensor de Tensão U_5V, fixando-se em termos de escala para $x_1 = 0,016\text{ V}$ o valor de $y_1 = 0^\circ$ e para $x_2 = 2,136\text{ V}$ o valor de $y_2 = 180^\circ\text{C}$. Para a ligação do anemómetro ao datalogger e escolha do tipo de canal, sensor e escala, teve-se em consideração a respectiva sensibilidade fornecida pelo fabricante que é de $92\text{ Hz} = 40\text{ m/s}$. Escolheu-se, assim, no datalogger, um canal não analógico, de impulso de frequência, fixando-se em termos de escala para $x_1 = 0\text{ Hz}$ o valor de $y_1 = 0\text{ m/s}$ e para $x_2 = 92\text{ Hz}$ o valor de $y_2 = 40\text{ m/s}$. No entanto, esta medição da velocidade do vento acabou por não ser realizada por anomalia técnica, que entretanto se verificou no anemómetro, recolhendo-se unicamente dados relativos à direcção do vento.

- Plataforma para a montagem do conjunto combinado anemómetro e cata-vento bem como do piranómetro (Figura 5.31);



Figura 5.31
PLATAFORMA JÁ COM A MONTAGEM DO PIRANÓMETRO, ANEMÓMETRO E CATA-VENTO

- Apoio da plataforma constituído por tubo em inox fixado com buchas químicas na chaminé da moradia (Figura 5.32).

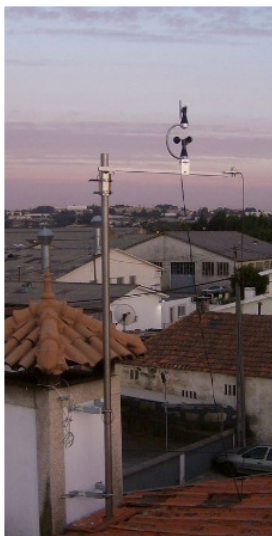


Figura 5.32
SUPORTE DA PLATAFORMA JÁ INSTALADO NUMA CHAMINÉ DA MORADIA

Nas Figuras 5.33, 5.34, 5.35, 5.36 e 5.37 apresentam-se as plantas e cortes da moradia com a indicação da localização da instrumentação utilizada no Verão de 2010, devidamente numerada.

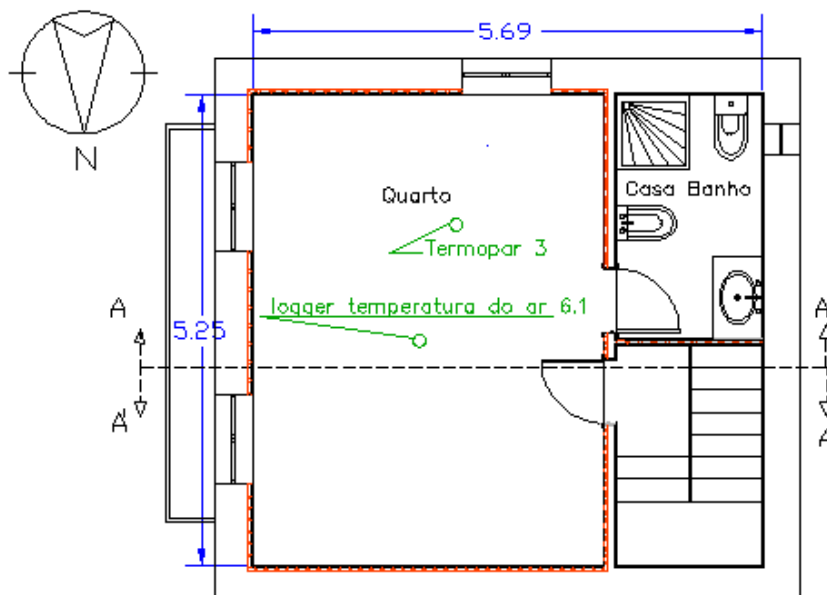


Figura 5.33
PLANTA DO 1º ANDAR DA ZONA ESTE COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2010

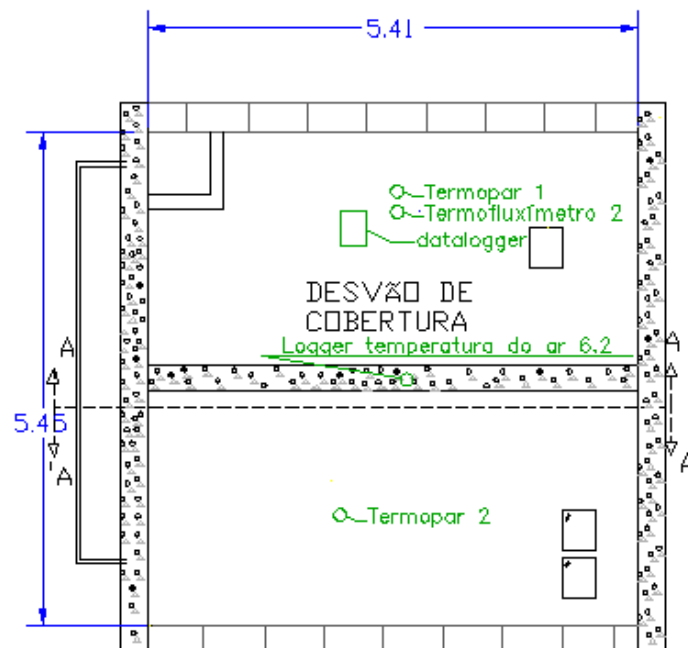


Figura 5.34
PLANTA DO DESVÃO DE COBERTURA DA ZONA ESTE COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2010

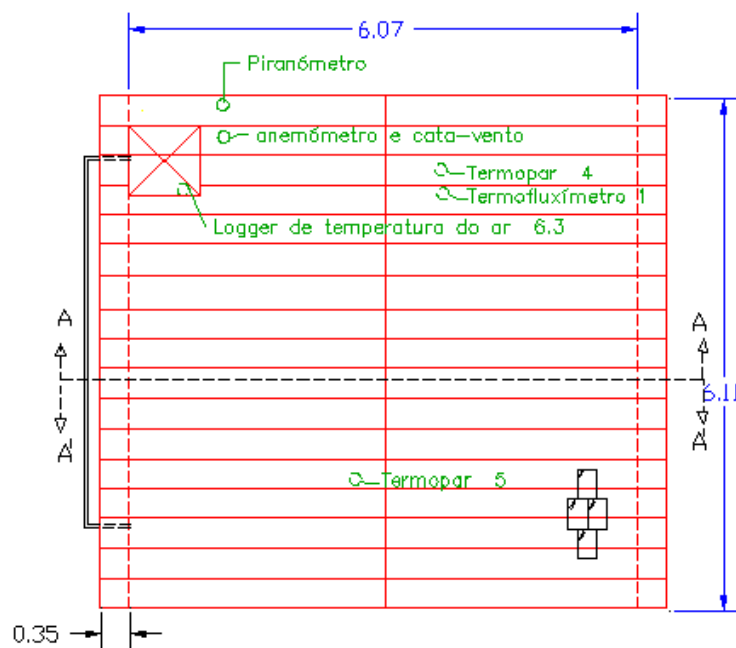


Figura 5.35
PLANTA DA COBERTURA DA ZONA ESTE COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2010

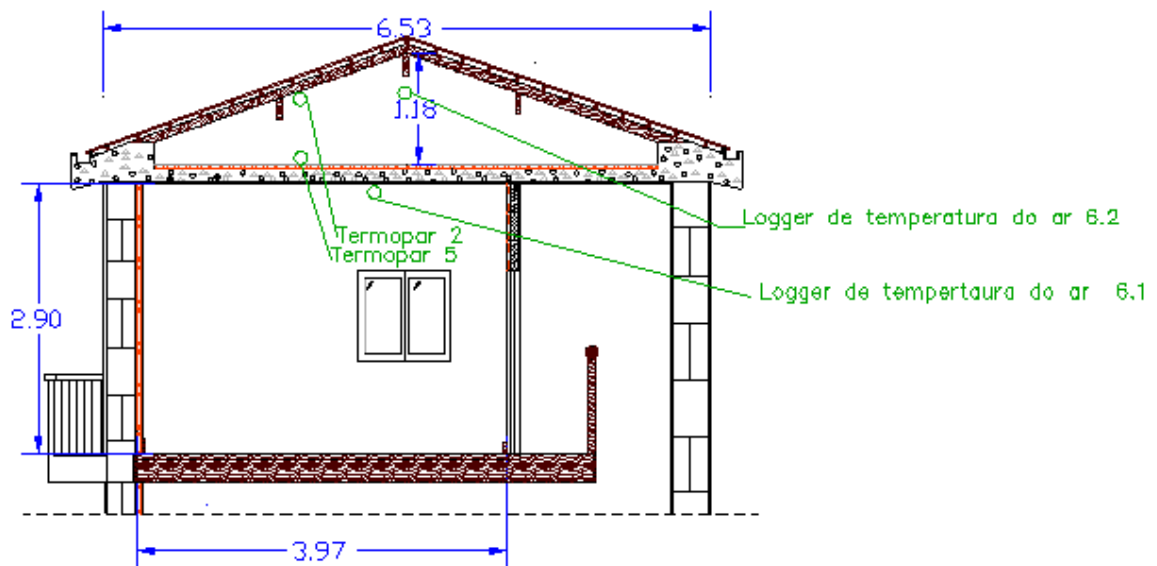


Figura 5.36
CORTE A' - A' COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2010

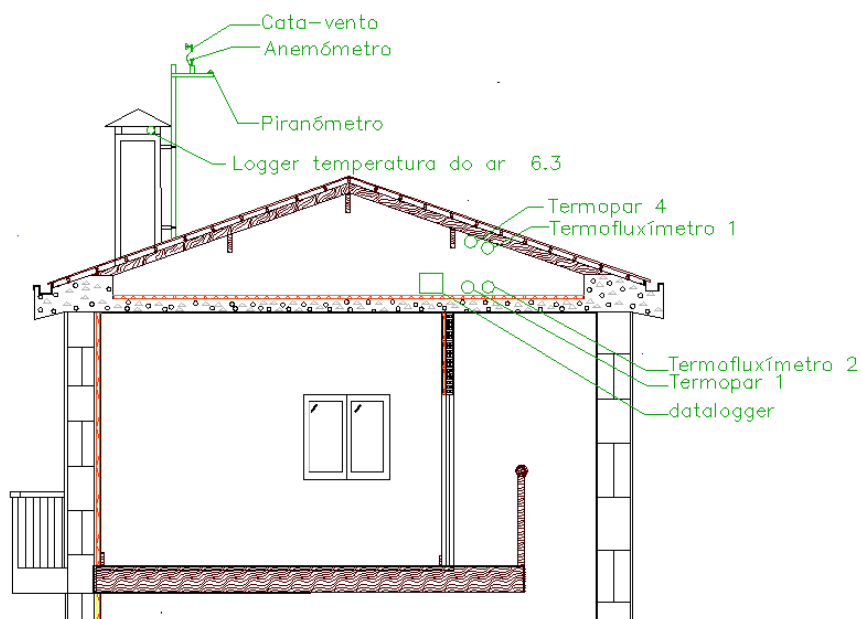


Figura 5.37
CORTE A - A COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2010

Já no respeitante aos ensaios realizados no Verão de 2011 apresenta-se na Figuras 5.38 um corte da zona este da moradia com a indicação da localização da instrumentação utilizada, devidamente numerada.

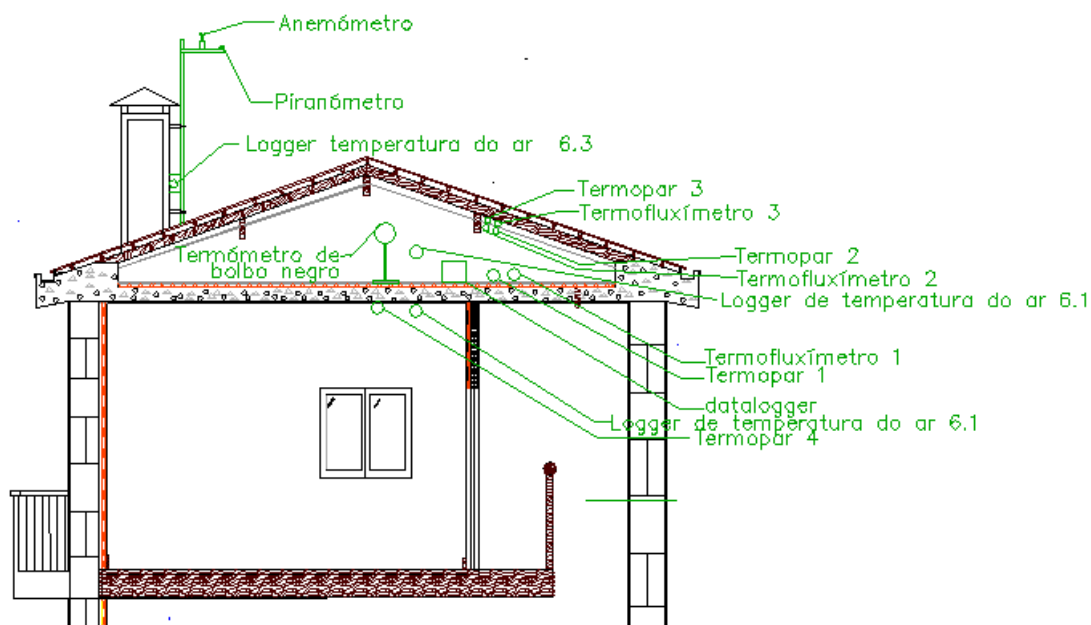


Figura 5.38
CORTE A – A COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2011

Ainda em relação aos ensaios realizados no Verão de 2011 apresenta-se nas Figuras 5.39, 5.40 e 5.41 as plantas da zona oeste da moradia bem como a indicação da localização da instrumentação utilizada, devidamente numerada.

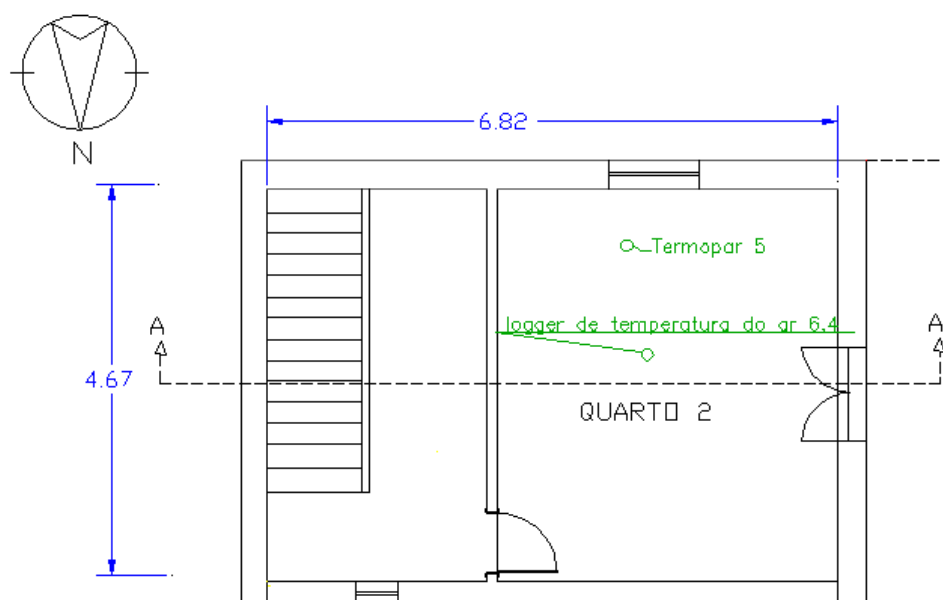


Figura 5.39
PLANTA DO 1º ANDAR DA ZONA OESTE COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2011

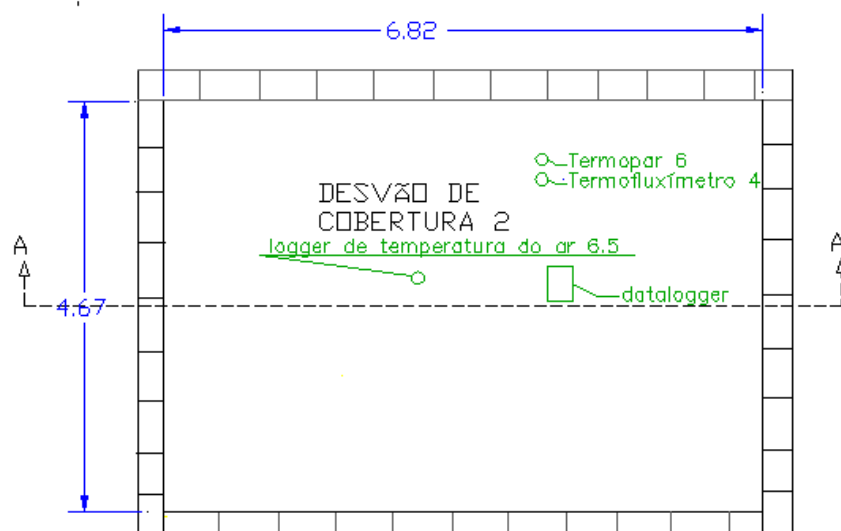


Figura 5.40
PLANTA DO DESVÃO DE COBERTURA DA ZONA OESTE COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2011

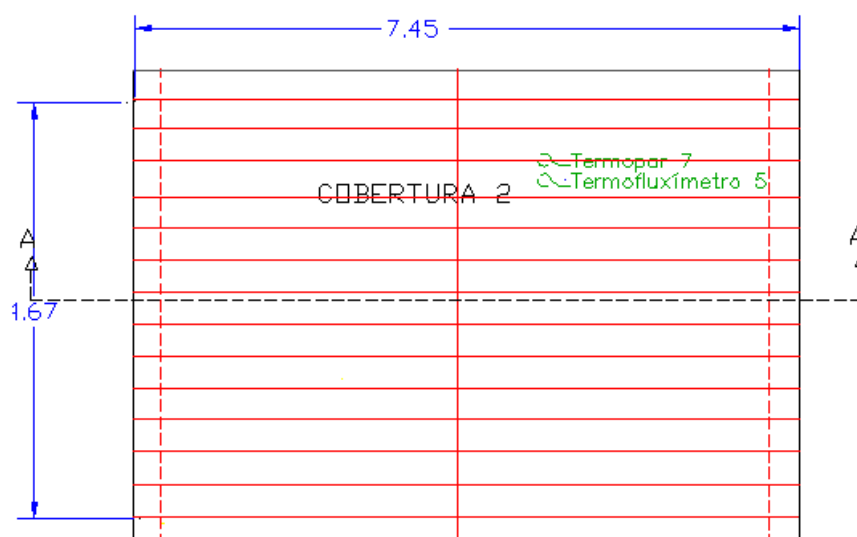


Figura 5.41
PLANTA DA COBERTURA DA ZONA OESTE COM LOCALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO NO VERÃO DE 2011

5.5 CALIBRAÇÃO

De modo a aferir a grau de rigor com que os sensores de temperatura estão a executar a medição, usaram-se câmaras climáticas existentes no Laboratório de Física das Construções (LFC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Na Figura 5.42a mostra-se a câmara climática usada para a calibração das sondas de temperatura com logger

incorporado e na Figura 5.42b mostra-se a câmara climática usada para a calibração dos termopares.



Figura 5.42 (a e b)
CÂMARAS CLIMÁTICAS

A técnica usada foi a de colocar as câmaras a uma temperatura fixa e colocar no seu interior os sensores de temperatura com logger incorporado (Figura 5.43) bem como os sensores de temperatura termopares tipo T (Figura 5.44) ligados através do “passa-muros” ao datalogger que foi colocado no exterior da câmara (Figura 5.45).



Figura 5.43
COLOCAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA COM LOGGER INCORPORADO NA CÂMARA CLIMÁTICA



Figura 5.44
COLOCAÇÃO DOS TERMOPARES TIPO T NA CÂMARA CLIMÁTICA



Figura 5.45
DATALOGGER NO EXTERIOR LIGADO AOS TERMOPARES TIPO T

Após um período de estabilização da temperatura de cerca de quinze minutos às novas condicionantes verificou-se o valor das temperaturas registadas pelos dataloggers e comparou-se com a temperatura de cada câmara climática. Apresenta-se no Quadro 5.4 os resultados obtidos da medição da temperatura do datalogger em relação aos termopares tipo T na situação em que a câmara climática registava uma temperatura de 35°C.

Quadro 5.4
VERIFICAÇÃO DA PRECISÃO DOS RESULTADOS DOS TERMOPARES TIPO T

Data	Hora	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
		TT_400C	TT_400C	TT_400C	TT_400C	TT_400C
		°C_	°C_	°C_	°C_	°C_
08-05-2010	18:40:00	36,3	36,6	36,2	36,2	36,7

Embora os resultados sejam superiores aos 35°C verifica-se uma proximidade razoável entre os valores resultantes dos vários termopares, para o mesmo instante no tempo. A situação de os valores serem superiores em mais de 1°C em relação à temperatura registada na câmara poderá ter a ver com o facto que os termopares ficaram sujeitos, sem qualquer proteção, à radiação das paredes da câmara. Efetivamente, o método ideal para a calibração de termopares é o do banho termoestatizado, método esse que não foi possível usar no âmbito deste trabalho.

Acresce, ainda, que tendo em conta o grau de precisão dos termopares tipo T, que é de +/- 1°C para temperaturas entre -20°C e 100°C (Millet,1984) e que as medições efetuadas são, sobretudo, para estudos comparativos, considerou-se que para o tipo de estudo objeto do presente trabalho a precisão será suficiente, pelo que não foram realizadas quaisquer correções aos valores obtidos.

No respeitante aos sensores de temperatura com logger incorporado, apresenta-se na Figura 5.46 os resultados, em forma de gráfico, das medições da temperatura realizadas por um dos sensores que foi submetido, dentro de uma das câmaras climáticas, a testes de verificação. Mais uma vez a câmara climática registava durante o ensaio uma temperatura de 35°C. Verificou-se que a temperatura registada pelos sensores de temperatura com logger incorporado estabilizou nos 34,4°C, sendo este um valor similar ao atingido no teste pelos restantes sensores deste tipo. Mais uma vez considerou-se que tendo em conta a margem de erro de medições experimentais e dentro do contexto do presente trabalho estes desvios são aceitáveis.

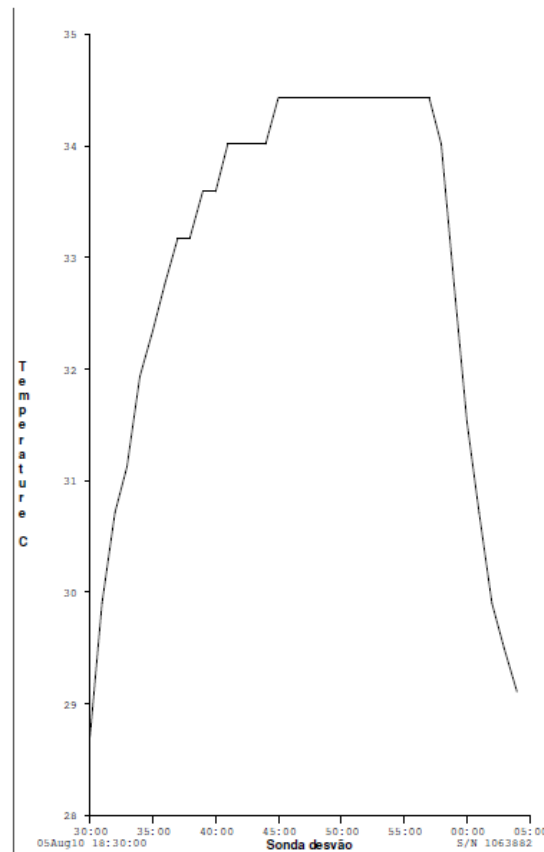


Figura 5.46
EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS REGISTRADAS NOS TESTES DE UM SENSOR COM LOGGER INCORPORADO

Faz-se notar que de forma a aferir se as câmaras climáticas estavam a registar corretamente o valor da temperatura, colocou-se dentro das próprias câmaras climáticas um termómetro digital portátil para efetuar a medição desta grandeza (Figura 5.47), tendo-se verificado desvios da ordem dos 0,3°C, o que se considerou ser aceitável para os trabalhos efetuados.



Figura 5.47
COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS MEDIDAS PELA CÂMARA E POR UM TERMÓMETRO DIGITAL PORTÁTIL

CAPÍTULO VI

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 ENSAIOS REALIZADAS NO VERÃO DE 2010

6.1.1 PERÍODOS DE TEMPO CONSIDERADOS PARA A ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Serão apresentados de seguida os resultados dos ensaios empreendidos de forma a ser possível caracterizar-se e comparar-se o comportamento da laje de esteira da zona este da moradia com e sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade (sistema de isolamento também conhecido por barreira radiante). Uma vez que não foi possível realizar simultaneamente as medições com e sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, nestas comparações foram sucessivamente desenvolvidas várias estratégias que principalmente englobaram escolhas direcionadas dos períodos de medição representativos. Tais estratégias podem resumir-se a quatro fases de execução de comparações que estão sucintamente resumidas a seguir:

- Primeira fase: Foram considerados os períodos totais de medição, antes e depois de colocar o isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, sem atender ao facto de estes possuírem durações e instantes de início e fim diferentes. Este estudo consistiu, pois, em utilizar todos os dados disponíveis retirados dos ensaios efetuados;
- Segunda fase: Tiveram-se em conta períodos um pouco mais reduzidos, contidos nos anteriores, em que as durações bem como os instantes de início e fim foram iguais. A ideia deste estudo foi o de ser possível ter um pouco mais de rigor e de legibilidade na comparação executada. No entanto, neste período, tal como no anterior, além das condições climáticas,

antes e depois da colocação do isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, não serem exatamente iguais, não existiu controlo da abertura e fecho das janelas, deixando assim esta situação sob a responsabilidade da normal atividade dos ocupantes do quarto. Obviamente que em relação às temperaturas obtidas no quarto esta variação não controlada dos caudais de ventilação bem como dos ganhos internos provocados pelos ocupantes e pelos ganhos solares através dos envidraçados, influencia as características térmicas deste espaço, proporcionando tal uma incerteza nas conclusões a tirar das comparações quanto à temperatura do ar e quanto à temperatura superficial do teto;

- Terceira fase: Tiveram-se em conta períodos ainda menores contidos nos anteriores, em que as condições climatéricas são muito semelhantes, e em que igualmente se utilizaram períodos com a mesma duração e com os mesmos instantes de início e fim, e em que se garantiu que as janelas e portas estiveram fechadas e os quartos desocupados permitindo assim anular a incerteza provocada pela variação dos caudais de ventilação no quarto e pelos diferentes ganhos internos ao longo do período de utilização.

Faz notar-se que os dados que foram utilizados para todos os períodos considerados em 2010 (bem como em 2011 e que mais à frente serão abordados) foram obtidos através da descarga dos mesmos a partir dos *loggers* dos sensores de temperatura/humidade bem como dos *datalogger*, usando para tal programas informáticos dedicados a esta função. Mostra-se na Figura 6.1 uma das fases da descarga dos dados de um dos *datalogger* para um computador portátil.



Figura 6.1
DESCARGA DE DADOS DE UM DATALOGGER PARA UM COMPUTADOR PORTÁTIL

De seguida serão apresentados e comentados resultados relativos a cada uma das referidas fases.

6.1.2 PRIMEIRA FASE: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA A TOTALIDADE DOS PERÍODOS DE MEDIÇÃO

Os períodos de medição considerados nesta análise foram para a situação antes da aplicação do isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade desde 17/8/2010 às 22h30min até 31/8/2010 às 7h20min e para a situação após aplicação de isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade de 2/9/2010 às 17h até 15/9/2010 às 16h. Apresentam-se no Quadro 6.1 os resultados das várias temperaturas superficiais, na esteira, nas vertentes e no teto do quarto bem como as temperaturas do ar, no exterior, no desvão de cobertura e no quarto antes e depois da aplicação do isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade. Estes resultados englobam a determinação de parâmetros estatísticos como sejam os mínimos e máximos, a variação máxima, as médias e o desvio padrão.

Quadro 6.1

VALORES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS E DAS TEMPERATURAS DO AR ANTES E DEPOIS DA APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO TÉRMICO COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE

	Temp. superf. esteira sul °C	Temp. superf. esteira norte °C	Temp. superf. teto quarto °C	Temp. superf. vertente sul °C	Temp. superf. vertente norte °C	Temp. exterior °C	Temp. desvão °C	Temp. quarto °C	Rad. solar total horiz. W/m ²
Sensor	1	2	3	4	5	6.3	6.2	6.1	Piran.
Com barreira radiante (setembro)									
Mínimos absolutos	16,9	16,2	22,3	13,3	13,5	14,5	13,3	21,3	0
Máximos absolutos	34,6	35,3	27,8	51	49,2	36,1	41,1	26,3	1026
Variações delta T	17,7	19,1	5,5	37,7	35,7	21,7	27,7	5,0	1026
Médias	23,9	24,1	24,8	25,3	26,6	22,4	23,3	23,6	218,8
Desvio Padrão	4,015	4,449	1,444	9,443	9,262	4,581	6,545	1,407	293,92
Sem barreira radiante (agosto)									
Mínimos absolutos	17,4	16,6	22,8	14,3	14,4	15,6	14,5	21,7	0
Máximos absolutos	42,0	43,5	30,0	55,2	51,7	37,0	45,4	29,9	1095
Variações delta T	24,6	26,9	7,2	40,9	37,3	21,4	30,9	8,2	1095
Médias	25,2	25,3	25,3	26,2	27,6	22,4	24,2	24,0	238,7
Desvio Padrão	5,196	5,859	1,412	9,436	9,329	4,547	6,667	1,514	310,66

Verifica-se, pois, que em termos médios, na situação com aplicação do isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, para a mesma temperatura média do ar exterior que a situação sem aplicação deste isolamento (que por coincidência deu o mesmo valor de 22,4°C), a temperatura do ar do desvão é menor em 1,1°C, a temperatura do ar do quarto é menor em 0,4°C e a temperatura superficial do teto do quarto é menor em 0,5°C. Obviamente que estas diferenças obtidas poderiam ter outra expressão caso se comparasse a situação da aplicação ou não do isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, sem a existência do isolamento térmico convencional resistivo de lã de rocha.

No que respeita aos valores máximos, verifica-se que para uma temperatura do ar exterior mais elevada em 0,9°C na situação sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, resulta que na situação com aplicação deste isolamento a temperatura do ar do desvão é menor em 4,3°C, a temperatura do ar do quarto é menor em 3,6°C e a temperatura superficial do teto do quarto é menor em 2,2°C.

É relevante, também, ter em conta, os dados relativos à radiação solar total horizontal, sendo que, como se pode constatar do Quadro 6.1, os valores são similares nos períodos respeitantes às situações de sem e com a colocação dos referidos isolamentos térmicos. Sendo evidente que em termos de valores médios, a radiação solar total horizontal no período respeitante à não colocação de isolamentos térmicos com revestimento refletante de baixa emissividade é superior à situação de uso destes isolamentos, é também claro que em termos de valores máximos passa-se exatamente o contrário.

Tendo em conta os valores máximos, atingidos, daqui se pode concluir que a grande vantagem do uso destes isolamentos se prende sobretudo com a atenuação da temperatura máxima no interior das habitações, sobretudo nos dias mais quentes e com maior incidência da radiação solar.

Como complemento aos dados anteriores, calcularam-se os valores das diferenças de temperatura máximas do ar entre o desvão e o exterior e entre o quarto e o exterior, antes e depois da aplicação do isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, chegando-se, no que diz respeito à situação sem este isolamento, a valores de respetivamente

8,4°C e -7,1°C e no que diz respeito à situação com este isolamento a valores de 4,9°C e -9,8°C também respetivamente.

Deste modo, conclui-se que em termos de diferenças de temperatura máximas entre o desvão e o exterior, a solução isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade permite uma diferença inferior em 3,5°C e em relação às diferenças de temperaturas máximas entre o exterior e o quarto a mesma solução de colocação destes isolamentos origina um diferencial de temperatura superior em 2,7°C. Mais uma vez se reforça a vantagem do uso dos isolamentos térmico com revestimento refletante de baixa emissividade para a atenuação da influência dos valores máximos da temperatura exterior e da radiação solar.

6.1.3 SEGUNDA FASE: COMPARAÇÃO PARA PERÍODOS UM POUCO MAIS REDUZIDOS EM QUE AS DURAÇÕES BEM COMO OS INSTANTES DE INÍCIO E FIM FORAM IGUAIS

6.1.3.1 Comparação usando períodos contínuos

Para esta análise, os períodos considerados foram os maiores possíveis para respeitar as condições da duração e dos instantes de início e fim serem os mesmos antes e depois da colocação do isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade. Apresenta-se na Figura 6.2 a evolução das temperaturas exteriores e das temperaturas do quarto para a situação sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade nos períodos de 18/8/2010, 21h a 30/8/2010, 21h30min. e para a situação com este isolamento de 2/9/2010, 21h a 14/9/2010, 21h30min..

Interessa referir que na zona assinalada na Figura 6.2 a temperatura do quarto para a situação sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade é anormalmente elevada, devido ao facto de nesses períodos se ter procedido à abertura das janelas.

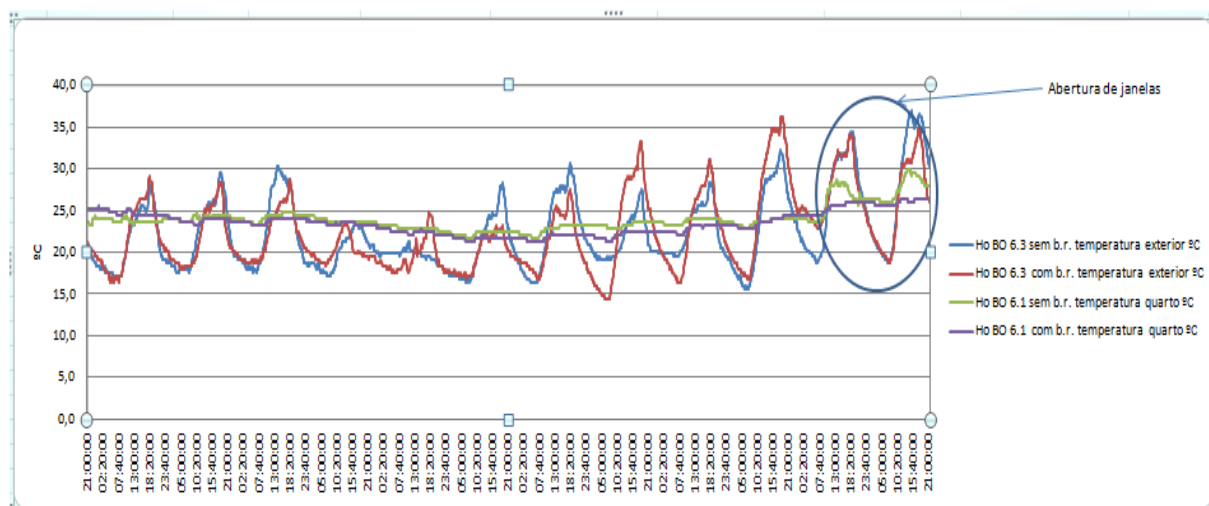


Figura 6.2
TEMPERATURAS DO AR EXTERIOR E DO QUARTO EM PERÍODOS COM E SEM ISOLAMENTO
TÉRMICO COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE

Na Figura 6.3 apresenta-se a evolução das temperaturas exteriores e das temperaturas do desvão de cobertura para o mesmo período.

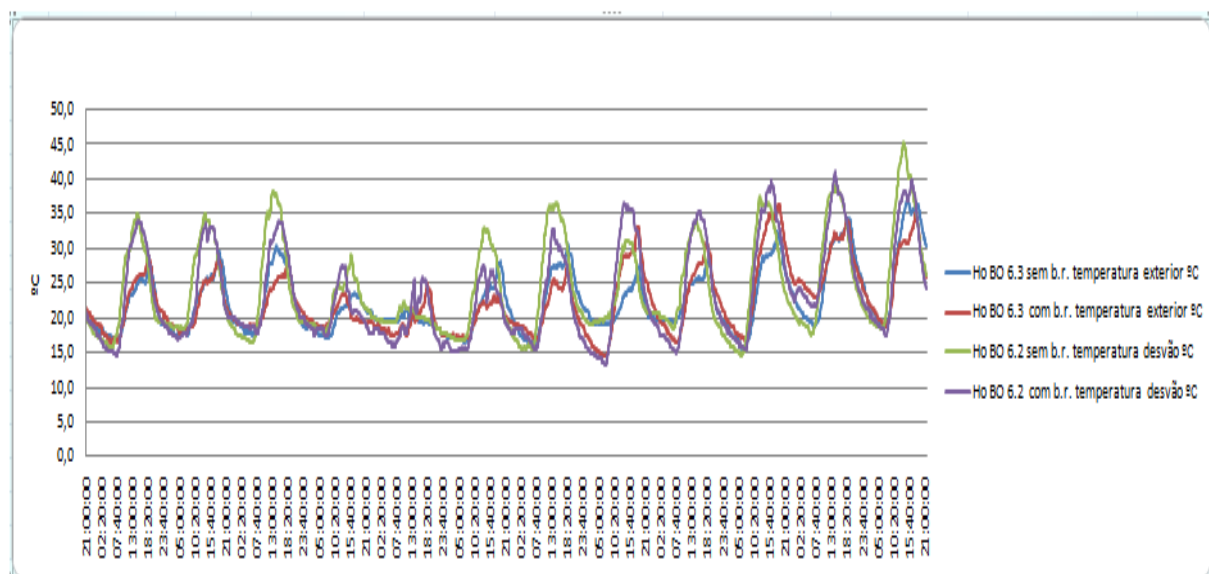


Figura 6.3
TEMPERATURAS DO AR EXTERIOR E DO DESVÃO EM PERÍODOS COM E SEM ISOLAMENTO
TÉRMICO COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE

Pode-se, pois, verificar que em dias em que os desvãos de cobertura atingem elevadas temperaturas, as diferenças entre a situação sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade e a situação com este isolamento são superiores às diferenças

entre as respetivas temperaturas exteriores. Também se evidencia o facto que existem períodos, como é o caso do primeiro dia, em que as temperaturas exteriores são superiores no período com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, enquanto as temperaturas no desvão de cobertura são inferiores ao período correspondente à situação sem este isolamento. Tais resultados apontam desde já, e mais uma vez, para as vantagens da aplicação dos isolamentos térmicos com revestimento refletante de baixa emissividade no sentido da atenuação dos valores máximos de temperatura, neste caso, no interior dos desvãos, o que é em especial vantajoso quando existem aproveitamentos destes espaços para funções úteis.

Apresenta-se na Figura 6.4 a evolução da temperatura do ar exterior e da radiação solar de forma a relacionar-se estas duas variáveis entre si bem como a relacionar-se com os resultados das temperaturas obtidas no desvão de cobertura e no quarto.

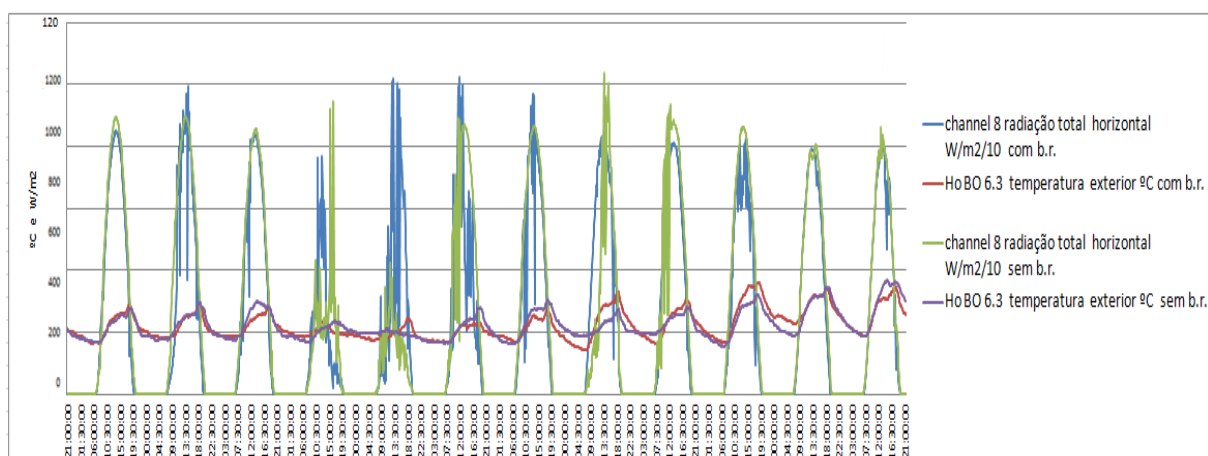


Figura 6.4
TEMPERATURAS DO AR EXTERIOR E DA RADIAÇÃO SOLAR TOTAL NA HORIZONTAL

Algo que se pode concluir da apreciação do gráfico anterior bem como do relativo à Figura 6.2 é que o valor máximo da temperatura do desvão de cobertura dá-se antes do máximo da temperatura exterior assim como o valor máximo da radiação solar dá-se antes do máximo da temperatura exterior, o que indica que a radiação solar tem uma importante influência nas temperaturas máximas atingidas no desvão. Também algo que se pode concluir da apreciação do gráfico da figura anterior é que nem sempre os períodos com maior radiação solar implicam maiores temperaturas do ar exterior e vice-versa. Deste modo, pode concluir-se que

para um determinado local não é somente a intensidade de radiação solar que influencia a temperatura do ar exterior mas também outros parâmetros climáticos como o vento e a humidade têm a sua participação. É de referir cumulativamente que no território circundante da moradia, e durante o período de medição, existiram vários incêndios cujo fumo emanado foi intenso e que afetou com certeza as condições climáticas da zona. Na Figura 6.5 pode constatar-se os efeitos de um dos incêndios ocorridos nesse período na zona envolvente da moradia.



Figura 6.5
INCÊNDIO OCORRIDO DURANTE O PERÍODO DE MEDIÇÃO

6.1.3.2 Comparação usando valores discretos correspondentes aos valores mais elevados da temperatura exterior e da radiação solar

De forma a verificar-se com mais pormenor qual o comportamento do sistema desvão mais quarto, nas situações com e sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, nos instantes em que as temperaturas do ar exterior e da radiação solar são muito elevadas, fez-se uma seleção desses períodos e compararam-se os respetivos valores.

No respeitante às temperaturas, escolheram-se os instantes em que nas situações com e sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, atingiram-se temperaturas do ar exterior superiores a 35°C. É claro que numa análise com valores discretos é importante ter sempre presente que as variações das temperaturas exteriores não estão em fase com as variações das temperaturas interiores. No respeitante à radiação solar

selecionaram-se instantes, tanto para a situação de com e de sem o referido isolamento térmico, referentes a valores da radiação solar total horizontal superiores a 900 W/m^2 .

Para temperaturas do ar exterior superiores a 35°C , apresenta-se no Quadro 6.2, os valores relativos às temperaturas médias e máximas obtidas para a temperatura do ar exterior, temperatura do ar do desvão e temperatura do ar do quarto.

Quadro 6.2
TEMPERATURAS MÉDIAS E MÁXIMAS OBTIDAS QUANDO A TEMPERATURA DO AR EXTERIOR ULTRAPASSOU OS 35°C

	Sem barreira Radiante temperatura exterior >35 $^\circ\text{C}$	Com barreira radiante temperatura exterior >35 $^\circ\text{C}$	Sem barreira radiante temperatura desvão $^\circ\text{C}$	Com barreira radiante temperatura desvão $^\circ\text{C}$	Sem barreira radiante temperatura quarto $^\circ\text{C}$	Com barreira radiante temperatura quarto $^\circ\text{C}$
Text $> 35^\circ\text{C}$						
Máximos absolutos	37,0	36,1	44,9	34,0	29,9	24,4
Médias	36,0	35,9	38,3	33,2	29,2	24,2

Nesta situação em que a temperatura média do ar exterior atingiu o valor de 36°C para os períodos considerados sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade e $35,9^\circ\text{C}$ para os períodos considerados com este isolamento, verificou-se que a temperatura média do quarto sem o referido isolamento foi de $29,2^\circ\text{C}$ enquanto com o mesmo foi de $24,2^\circ\text{C}$, ou seja para uma temperatura exterior média mais baixa em $0,1^\circ\text{C}$, o abaixamento da temperatura média no quarto foi de 5°C . Em relação às temperaturas máximas atingidas, verifica-se que para um valor da temperatura exterior $0,9^\circ\text{C}$ superior no caso sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, a temperatura máxima atingida no quarto foi $5,5^\circ\text{C}$ superior.

Antes de tirar qualquer conclusão face aos resultados anteriores, será pois necessário estudar a dependência das temperaturas interiores do desvão e do quarto, também, com a radiação solar. Assim, apresenta-se no Quadro 6.3 os valores médios e máximos obtidos para a radiação solar e para as temperaturas do ar do desvão e do ar do quarto.

Quadro 6.3
TEMPERATURAS MÉDIAS E MÁXIMAS OBTIDAS QUANDO A RADIAÇÃO SOLAR TOTAL
HORIZONTAL ULTRAPASSOU OS 900 W/m²

	Sem barreira radiante Rad. tot. hor. > 900 W/m ²	Com barreira radiante Rad. tot. hor. > 900 W/m ²	Sem barreira radiante	Com barreira radiante	Sem barreira radiante	Com barreira radiante
Rad. tot. hor > 900 W/m²	W/m²	W/m²	Temperatura desvão °C	Temperatura desvão °C	Temperatura quarto °C	Temperatura quarto °C
Máximos absolutos	1095	1026	31,52	33,59	24,01	24,01
Médias	955,33	969,75	30,28	27,55	23,5	22,61

Da análise do quadro anterior, pode-se concluir que para valores médios da radiação solar, superiores no período em que se colocou o isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, resultaram temperaturas médias do ar do desvão e quarto, neste período, menores em respetivamente 2,73°C e 0,89°C. Quanto aos valores máximos, verifica-se que embora para a situação sem o referido isolamento a radiação solar seja superior à da existência do mesmo, as temperaturas interiores no desvão atingem valores inferiores.

De forma a contribuir-se para a explicação dos resultados anteriores, no que concerne à temperatura do desvão, convém alertar que esta temperatura não se deve unicamente à radiação solar ou unicamente à temperatura exterior mas sim à conjugação destes fatores e eventualmente de outros como é o caso da ventilação do desvão que tem uma significativa dependência das condições do vento, nomeadamente da sua velocidade e direção.

Fazendo uma sinergia dos resultados dos Quadros 6.2 e 6.3, pode-se concluir que efetivamente a aplicação de isolamentos térmicos com revestimento refletante de baixa emissividade apresenta vantagens no que respeita às menores temperaturas atingidas tanto no desvão como no quarto. Constata-se dos referidos Quadros, que para temperaturas médias exteriores praticamente idênticas e para valores superiores da radiação solar na situação com o referido isolamento do que sem o uso do mesmo, as temperaturas médias no desvão e no quarto são sempre menores na primeira situação, atingindo em alguns casos diferenças substanciais. É de realçar, que durante os períodos considerados para este estudo, não existiu qualquer coincidência em termos de instantes em que se verificaram valores da radiação superiores a 900 W/m² e valores das temperaturas exteriores superiores ora a 30°C ora a 35°C.

Assim se depreende que não existe correlação direta entre os máximos atingidos pela radiação solar e pela temperatura exterior.

6.1.3.3 Comparação usando valores contínuos correspondentes às temperaturas mais elevadas

O estudo explanado em 6.1.3.2 é caracterizado por selecionar os instantes (que na análise efetuada correspondem a intervalos de tempo de 10 minutos de duração) em que a temperatura do ar exterior é a mais elevada, sendo pois um conjunto de valores discretos ou descontínuos. Este tipo de análise tem a desvantagem de não ter em conta a influência das condições inerentes aos períodos anteriores que naturalmente influenciam os períodos seguintes. Deste modo, procurou-se também analisar períodos contínuos correspondentes às temperaturas do ar exterior mais elevadas.

No respeitante ao período em que não se usou isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade selecionou-se o período de 29/8/2010, 0h a 31/8/2010, 0h. No respeitante ao período relativo ao uso desse isolamento escolheu-se o intervalo de tempo de 13/9/2010, 0h a 15/9/2010, 0h. Alerta-se que, em relação ao período referido sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade existiu abertura de janelas (pelo menos no dia 29/8). Apresenta-se no Quadro 6.4 os resultados das temperaturas exteriores, do desvão de cobertura e do quarto nesses períodos.

Quadro 6.4
TEMPERATURAS EXTERIORES, DO DESVÃO E DO QUARTO EM PERÍODOS CONTÍNUOS EM QUE A TEMPERATURA DO AR EXTERIOR ATINGIU VALORES ELEVADOS

	temperatura exterior Sem barreira radiante °C	temperatura exterior Com barreira radiante °C	temperatura desvão Sem barreira radiante °C	temperatura desvão Com barreira radiante °C	temperatura quarto Sem barreira radiante °C	temperatura quarto Com barreira radiante °C
Mínimos absolutos	18,7	18,7	17,5	17,5	23,6	24,4
Máximos absolutos	37,0	34,9	45,4	41,1	29,9	26,3
Variações delta T	18,3	16,2	27,9	23,5	6,3	1,9
Médias	26,8	26,6	28,2	27,7	26,7	25,6
Desvio Padrão	5,9	4,3	8,3	7,0	1,8	0,7

Verifica-se, assim, que nos dois períodos para temperaturas médias do ar exterior muito idênticas (no período sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade somente com mais 0,2°C do que no com o referido isolamento), a temperatura média do ar do desvão foi no caso com o isolamento térmico com revestimento refletante de

baixa emissividade inferior em $0,5^{\circ}\text{C}$ e a temperatura média do ar do quarto foi para a mesma situação inferior em $1,1^{\circ}\text{C}$.

Quanto às temperaturas máximas e mínimas verifica-se uma menor diferença entre elas na situação com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, pois as temperaturas máximas são menores e as mínimas em geral maiores (no desvão é que se mantiveram inalteradas). Enquanto que em relação à temperatura do ar exterior a variação sem o referido isolamento, foi de $18,3^{\circ}\text{C}$ e na situação com o mesmo, foi de $16,2^{\circ}\text{C}$, ou seja menos $2,1^{\circ}\text{C}$. Em complemento verifica-se que a mesma variação para a temperatura do ar do desvão foi de $27,9^{\circ}\text{C}$ para a situação sem o citado isolamento e de $23,5^{\circ}\text{C}$ na situação com o mesmo, ou seja menos $4,4^{\circ}\text{C}$. No respeitante à temperatura do ar do quarto foi também de menos $4,4^{\circ}\text{C}$ para a situação com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade. Na Figura 6.6 apresenta-se sob o ponto de vista gráfico a evolução das temperaturas do ar exterior e da temperatura do ar do quarto nos períodos com e sem o referido isolamento.

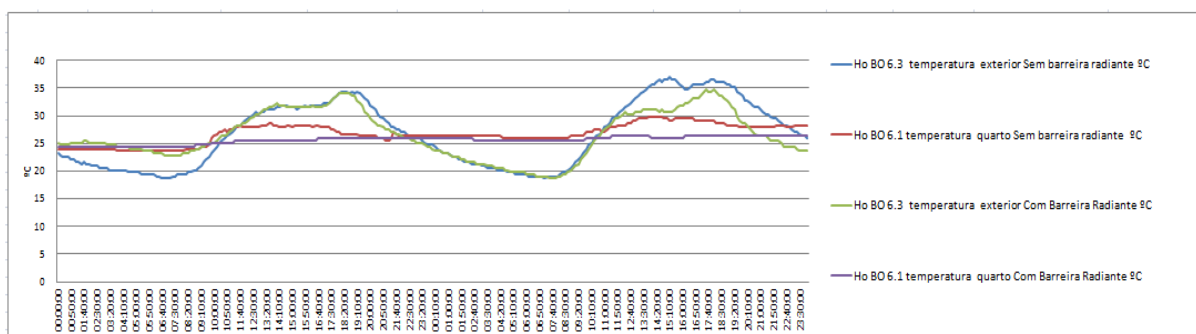


Figura 6.6
EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS DO AR EXTERIOR E DO QUARTO NOS PERÍODOS CONTÍNUOS DE TEMPERATURAS MAIS ELEVADAS

É patente na situação com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade a reduzida variabilidade da temperatura do ar do quarto bem como o não atingirem-se temperaturas tão elevadas. No entanto, relembra-se que a abertura das janelas poderá ter influenciado este resultado.

Devido ao facto da radiação solar ser um parâmetro relevante no comportamento térmico dos edifícios, importa também indicar que para os períodos considerados no estudo, cujos

resultados das temperaturas se apresentaram no Quadro 6.4, a radiação solar total horizontal no período sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade atingiu o máximo de 861 W/m^2 e uma média de $255,6 \text{ W/m}^2$ e no período com este isolamento atingiu o máximo de 809 W/m^2 e uma média de $240,9 \text{ W/m}^2$, valores pois muito semelhantes.

6.1.4 TERCEIRA FASE: COMPARAÇÃO NUM PERÍODO EM QUE AS EVOLUÇÕES DAS TEMPERATURAS EXTERIORES DO AR SÃO SIMILARES E EM QUE EXISTE A GARANTIA DE NÃO ABERTURA DOS VÃOS

Visto no presente estudo ter-se utilizado o mesmo desvão e quarto para a comparação do comportamento térmico com e sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade aplicado na laje de esteira, existe a vantagem de em termos de geometria e materiais poder garantir-se que tudo é perfeitamente igual. O problema que este método traz é o da desigualdade das condições climáticas em diferentes períodos de ensaio. É impossível em períodos diferentes produzir-se as mesmas condições de temperatura do ar exterior, radiação solar, velocidade do vento, entre outros. No entanto, verifica-se que os períodos de medição escolhidos para esta análise apresentam condições climáticas muito similares, daí a viabilidade da execução do presente estudo.

Outra situação essencial e que implica alteração das condicionantes do ensaio é o facto que a abertura das janelas e portas, executada pelos ocupantes, nunca ser realizada exatamente do mesmo modo.

Devido a tal evidência, no presente estudo, existiram períodos de medição em que se garantiu a não utilização do quarto, permanecendo as janelas (e respetivas portadas) e portas fechadas. Nestes períodos em que se manteve o quarto completamente desocupado, fez-se uma comparação das temperaturas do ar exterior, medidas tanto sem a utilização de isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade como com a utilização desse isolamento, de forma a seleccionar subperíodos com alguma expressão temporal (Figura 6.7).

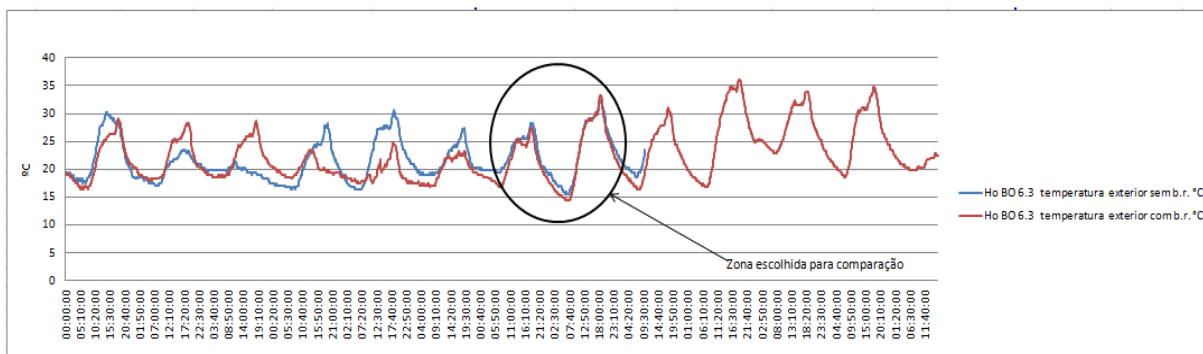


Figura 6.7
COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO AR EXTERIOR E ESCOLHA DE UM PERÍODO DE ESTUDO

De acordo com os dados da figura anterior, e para efetuar a referida comparação, escolheu-se a zona assinalada em que as variações das temperaturas do ar exterior são praticamente as mesmas. Apresenta-se no Quadro 6.5 as características da temperatura exterior nos períodos selecionados nas situações com e sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade.

Quadro 6.5
CARACTERÍSTICAS DA TEMPERATURA EXTERIOR NOS PERÍODOS SELECIONADOS

	temperatura exterior sem barreira radiante °C	temperatura exterior com barreira radiante °C
Mínimos absolutos	15,6	14,5
Máximos absolutos	32,3	33,2
Variações delta T	16,7	18,7
Médias	22,4	21,1
Desvio Padrão	4,1	4,6

Verifica-se que a temperatura média do período relativo ao uso de isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade foi inferior em 1,3°C ao período sem esse isolamento, embora a temperatura máxima fosse superior e a temperatura mínima inferior, ou seja em termos de variações de temperatura do ar exterior existiu uma amplitude maior na situação do referido isolamento.

Como a radiação solar é uma das variáveis climáticas que, além da temperatura do ar exterior, influencia significativamente as temperaturas do ar do desvão e do quarto, apresenta-se na Figura 6.8 a evolução da radiação solar total em plano horizontal para os mesmos períodos selecionados.

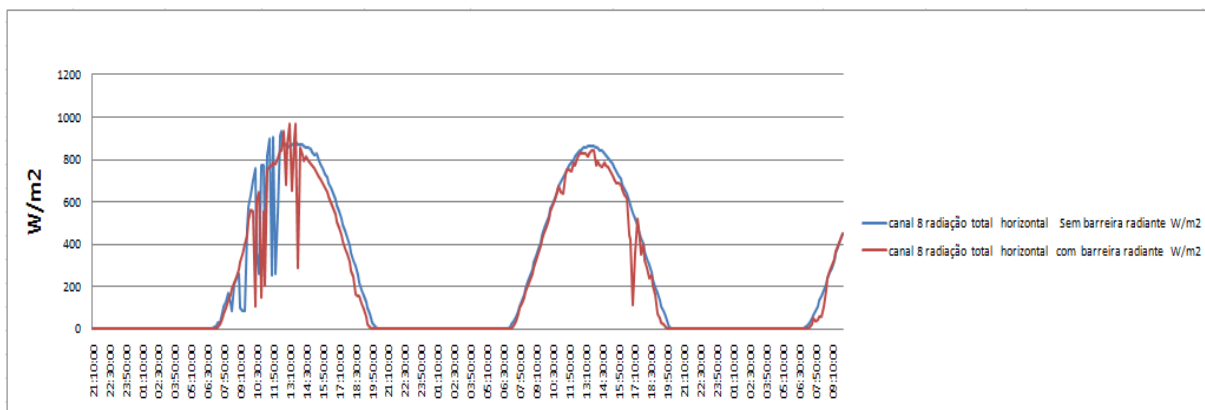


Figura 6.8
COMPARAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR TOTAL HORIZONTAL NO PERÍODO SELECIONADO

Verifica-se que além da temperatura do ar exterior, também a evolução da radiação solar nos períodos selecionados é muito idêntica, facto que é essencial para se efetuar de uma forma credível a comparação dos resultados da temperatura do ar do desvão e do quarto nas situações com e sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade. Em relação às irregularidades de traçado existentes nas curvas da figura acima estas devem-se muito provavelmente à nebulosidade dispersa que encobre frequentemente o sol de uma forma não contínua. Apresentam-se no Quadro 6.6, como complemento a esta análise, os valores médios, mínimos e máximos da radiação solar horizontal nos períodos selecionados com e sem o referido isolamento térmico.

Quadro 6.6
CARATERÍSTICAS DA RADIAÇÃO SOLAR NOS PERÍODOS SELECIONADOS

	radiação total horizontal Sem barreira radiante W/m²	radiação total horizontal Com barreira radiante W/m²
Mínimos absolutos	0	0
Máximos absolutos	936	971
Variações delta T	936	971
Médias	229,2	211,0
Desvio Padrão	317,2	299,9

Verifica-se que a radiação solar total no período correspondente à situação integrando isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade foi em média algo inferior à situação sem este isolamento, sendo que em termos de valores máximos no período integrando o referido isolamento atingiu-se um valor algo superior. No entanto, são valores muito próximos o que permite tirar conclusões com a credibilidade necessária para o presente

estudo. Abordando agora os resultados a nível das condições de ambiente térmico do quarto, apresenta-se na Figura 6.9 a evolução das temperaturas do ar atingidas no seu interior.

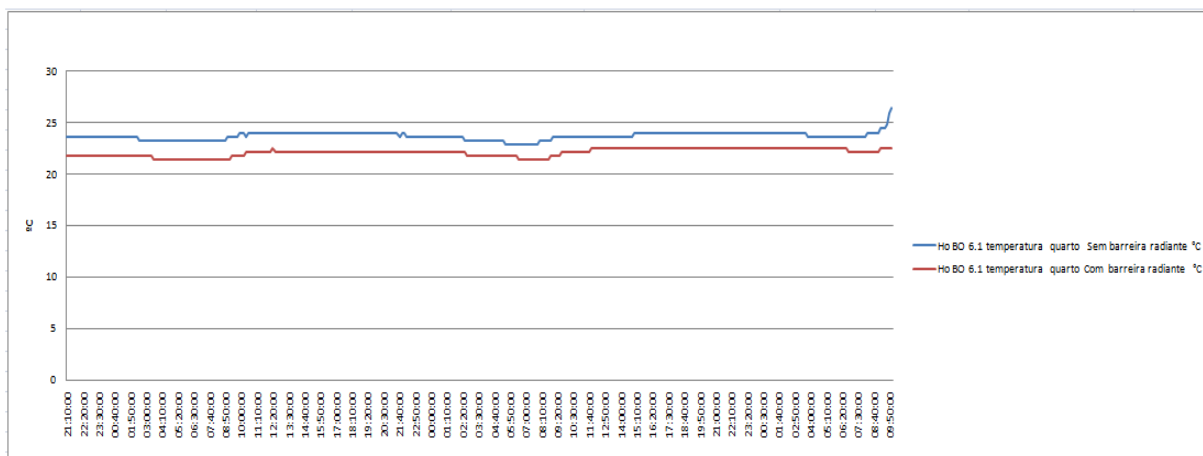


Figura 6.9
COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS NO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS

Pela análise do gráfico anterior, verifica-se que a temperatura do ar interior do quarto na situação sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade foi claramente superior à atingida na situação com esse isolante. Apresenta-se resumidamente no Quadro 6.7 as características da temperatura do ar no quarto nos períodos selecionados com e sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade.

Quadro 6.7
TEMPERATURA DO AR NO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS

	temperatura Quarto Sem barreira radiante °C	temperatura Quarto Com barreira radiante °C
Mínimos absolutos	22,9	21,3
Máximos absolutos	26,3	22,5
Variações delta T	3,5	1,2
Médias	23,7	22,0
Desvio Padrão	0,4	0,4

Verifica-se que a temperatura média do ar interior do quarto com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade foi inferior em 1,7°C do que na situação sem este isolamento, quando a temperatura média do ar exterior no período respeitante ao uso do referido isolamento foi inferior em 1,3°C do que na situação sem o mesmo. No respeitante à temperatura máxima atingida no interior do quarto, verifica-se que com isolamento térmico

com revestimento refletante de baixa emissividade a temperatura do ar foi mais baixa em $3,8^{\circ}\text{C}$ do que sem este isolamento, quando a nível da temperatura máxima do ar exterior verificou-se que no período respeitante à utilização do referido isolamento este foi superior em $0,8^{\circ}\text{C}$ do que no período sem o mesmo.

Deste modo e considerando o diferencial absoluto entre as temperaturas máximas atingidas no exterior e no interior do quarto verifica-se que com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade este foi $4,6^{\circ}\text{C}$ inferior à situação sem este isolamento, evidenciando-se, pois, inequivocamente, a vantagem do uso dos referidos isolamentos no que diz respeito à atenuação de temperaturas elevadas, sendo que em termos médios a vantagem aparentemente já não é tão evidente, realçando-se no entanto que nestas médias entra sempre o período noturno.

Para apresentar com mais pormenor esta situação, indica-se na Figura 6.10 a evolução, ao longo do tempo, dos diferenciais de temperatura do ar exterior em relação ao quarto, nas situações com e sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade.

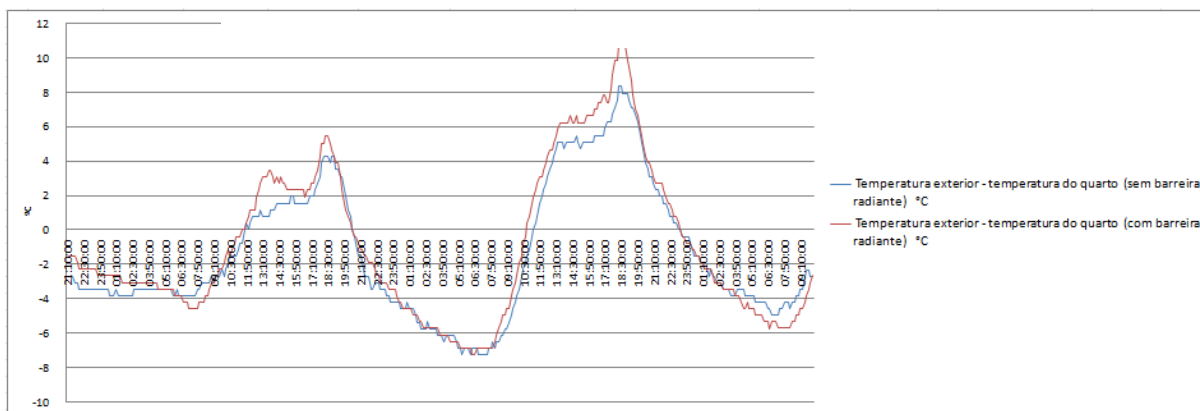


Figura 6.10

COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR EXTERIOR FACE À DO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS

Verifica-se pois, claramente, que na situação com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, o diferencial entre a temperatura do ar exterior e a temperatura do ar interior do quarto foi maior no período de temperaturas do ar exterior mais elevadas e em geral ligeiramente menor no período de temperaturas do ar exterior mais baixas, deste modo pode concluir-se que efetivamente o uso dos referidos isolamentos nos períodos mais quentes aumenta a diferença de temperatura entre o ar exterior e o ar interior do

quarto, evitando assim que as temperaturas no interior das habitações atinjam valores tão elevados.

Apresenta-se no Quadro 6.8 as características resumidas da variação da temperatura do ar exterior face à do quarto, nos períodos selecionados, com e sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade.

Quadro 6.8
VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR EXTERIOR FACE À DO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS

	Variação da temperatura exterior face à do quarto Sem barreira radiante °C	Variação da temperatura exterior face à do quarto Com barreira radiante °C
Mínimos absolutos	-7,2	-7,2
Máximos absolutos	8,3	10,7
Variações delta T	15,6	17,9
Médias	-1,4	-0,9
Desvio Padrão	3,9	4,4

Constata-se, pois, que a variação máxima para um determinado instante entre a temperatura do ar exterior e a do quarto referente às situações com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade apresentou uma diferença 2,4°C superior à referente situação sem este isolamento, evidenciando-se, pois, mais uma vez as vantagens da colocação do referido isolamento no sentido de atenuar a temperatura do ar interior do quarto face à temperatura do ar exterior.

Considerando valores médios (contabilizando-se também o período noturno) essa variação é negativa, ou seja a temperatura do quarto em média é superior à temperatura exterior, sendo que sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade essa variação é superior em 0,5°C do que na situação com este isolamento, concluindo-se pois que o quarto está em média a uma temperatura superior sem o referido isolamento térmico. Como estes resultados médios contabilizam tanto o período diurno como o noturno, onde neste último a temperatura do quarto é normalmente superior à temperatura exterior, apresenta-se de seguida o mesmo estudo mas só considerando os períodos mais quentes do dia, nomeadamente das 8h às 20h. Acresce, ainda, a vantagem que ao realizar-se um estudo comparativo para este período está-se a ser mais rigoroso pois como se pode constatar na Figura 6.6 a temperatura

do ar exterior entre o período com e sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade tem uma semelhança maior, sendo durante a noite onde os desvios são um pouco maiores. No Quadro 6.9 apresentam-se os resultados comparativos relativamente à temperatura absoluta do ar do quarto.

Quadro 6.9
COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA ABSOLUTA, ENTRE AS 8H E AS 20H, DO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS

8h-20h	temperatura quarto Sem barreira radiante °C	temperatura quarto Com barreira radiante °C
Mínimos absolutos	23,2	21,3
Máximos absolutos	26,3	22,5
Variações delta T	3,1	1,2
Médias	23,9	22,1
Desvio Padrão	0,4	0,3

Verifica-se que a temperatura média do ar do quarto com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade foi inferior em 1,8 °C em relação à situação sem este isolamento, quando a temperatura média do ar exterior no período com o referido isolamento foi inferior em 1,3°C do que na situação sem o mesmo. Em termos de máximas temperaturas atingidas no interior do quarto, verifica-se que na situação com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, e considerando o diferencial absoluto entre as temperaturas máximas atingidas no exterior e no interior do quarto, verifica-se, como já foi apontado atrás, que este foi 4,6°C inferior à situação sem o referido isolamento. Apresenta-se no Quadro 6.10, resumidamente, as características da variação da temperatura do ar exterior face à do quarto nos períodos seleccionados das 8h às 20h com e sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade.

Quadro 6.10
COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR EXTERIOR, ENTRE AS 8H E AS 20H, FACE À DO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS

8h-20h	Variação da temperatura exterior face à do quarto Sem barreira radiante °C	Variação da temperatura exterior face à do quarto Com barreira radiante °C
Mínimos absolutos	-6,9	-6,5
Máximos absolutos	8,3	10,7
Variações delta T	15,2	17,2
Médias	1,3	2,1
Desvio Padrão	3,8	4,4

Constata-se, pois, que a variação máxima entre a temperatura do ar exterior e a do quarto referente à situação com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade foi superior $2,4^{\circ}\text{C}$ em relação à situação sem este isolamento. Em média essa variação foi maior em $0,8^{\circ}\text{C}$ na situação com o referido isolamento do que sem este, constatando-se pois, mais uma vez, que com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade existiram efetivamente vantagens no controlo das temperaturas mais elevadas do quarto.

Porque para a existência de conforto térmico no quarto, também interessa a temperatura superficial do teto do mesmo, apresenta-se na Figura 6.11 o gráfico que mostra a sua evolução ao longo do período total selecionado.

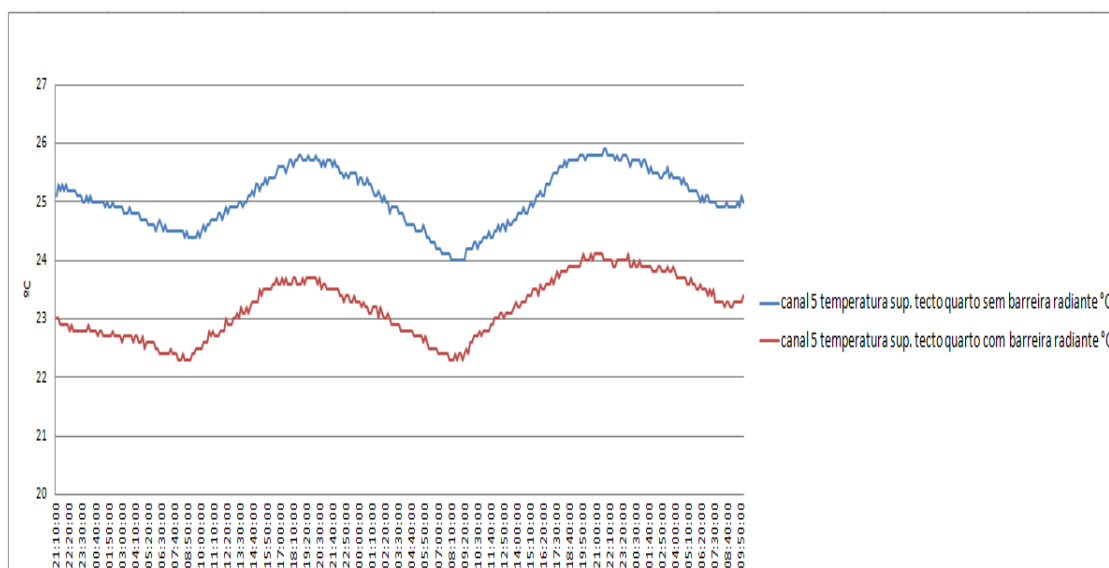


Figura 6.11
COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DO TETO NOS PERÍODOS SELECIONADOS

É pois claro que a temperatura superficial do teto do quarto na situação com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade foi mais baixa do que na situação sem este isolamento.

Para que se possam retirar conclusões com mais propriedade, apresenta-se no Quadro 6.11 as características resumidas da temperatura superficial do teto do quarto nos períodos selecionados com e sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade.

Quadro 6.11
CARACTERÍSTICAS DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DO TETO DO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS

	temperatura sup. tecto quarto Sem barreira radiante °C	temperatura sup. tecto quarto Com barreira radiante °C
Mínimos absolutos	24	22,3
Máximos absolutos	25,9	24,1
Variações delta T	1,9	1,8
Médias	25,1	23,2
Desvio Padrão	0,493	0,520

Verifica-se que a temperatura superficial média do teto do quarto na situação com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade foi inferior em 1,9°C do que na situação sem este isolamento, quando a temperatura média do ar exterior no período correspondente à utilização do referido isolamento foi inferior em 1,3°C do que na situação sem o mesmo.

No respeitante à temperatura máxima atingida no teto do quarto, verifica-se que com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade a temperatura foi mais baixa em 1,8°C do que sem este isolamento, quando a nível da temperatura máxima do ar exterior verifica-se que no período respeitante à utilização do referido isolamento esta foi superior em 0,8°C do que no período sem o mesmo.

Deste modo e considerando o diferencial absoluto entre as temperaturas máximas atingidas no ar exterior e no teto do quarto, verifica-se que com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade este foi 2,6°C inferior à situação sem este isolamento, evidenciando-se pois, mais uma vez, a vantagem do uso do referido isolamento no que diz respeito à atenuação dos picos de temperatura.

Para mostrar, com mais pormenor, esta situação, indica-se na Figura 6.12 a evolução ao longo do tempo dos diferenciais de temperatura exterior face ao teto do quarto nas situações com e sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade.

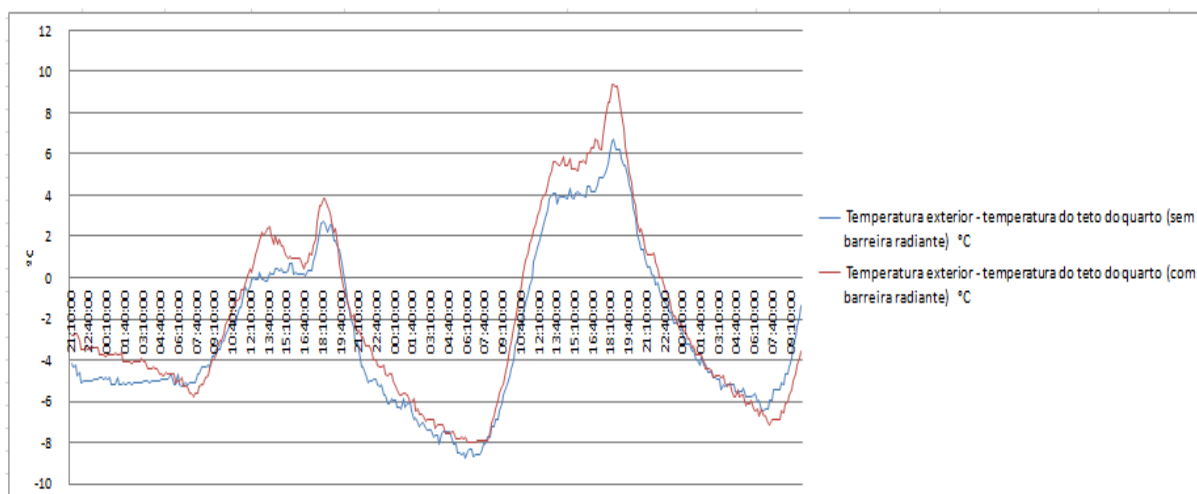


Figura 6.12

COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR EXTERIOR FACE À TEMPERATURA DO TETO DO QUARTO NOS PERÍODOS SELECIONADOS

É, pois, evidente que foi nos períodos em que se atingiram temperaturas mais elevadas, que para a situação com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade existiu uma maior diferença entre a temperatura do ar exterior e a temperatura superficial do teto em relação à situação sem este isolamento. No que diz respeito à análise dos valores dos fluxos de calor é relevante referir que devido ao facto de nos fluxímetros que foram aplicados na superfície de alumínio, do isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade aplicado na esteira, não terem sido recobertos com folha de alumínio das mesmas características, os resultados apresentaram variações incompreensíveis e como tal não se consideraram fiáveis para poderem ser apresentados. Já na campanha de ensaios efetuada no verão de 2011, esta situação foi resolvida, sendo deste modo apresentados em 6.2 também resultados de medições de fluxos de calor.

6.2 ENSAIOS REALIZADOS NO VERÃO DE 2011

6.2.1 PROCEDIMENTOS SEGUIDOS NAS MEDIÇÕES

Em 2011 seguiu-se uma estratégia diferente da seguida em 2010, pois para realizar estudos comparativos usaram-se duas coberturas (uma na parte este e outra na oeste da moradia) de

dimensões semelhantes, com soluções distintas de isolamento, sendo a recolha de dados realizada simultaneamente nos mesmos períodos de tempo. Esta metodologia tem a vantagem de utilizar exatamente as mesmas condições climáticas para as várias soluções de isolamento térmico mas tem a desvantagem das características geométricas, térmicas e de ventilação das duas coberturas não serem exatamente iguais. Em todos os ensaios efetuados procurou-se manter ambos os quartos desocupados, sendo que nos dias em que tiveram que ser ocupados procurou-se que as condições respetivas fossem as mais similares possíveis (número de ocupantes igual e evitando a abertura das janelas).

Nestes ensaios, e numa primeira fase, utilizaram-se, além dos sensores de temperatura com *logger* incorporado, que em alguns casos também englobavam a possibilidade de medição da humidade do ar, um *datalogger*, com 16 canais analógicos e 2 de impulso de frequência, ao qual se ligou a instrumentação, distribuída pelas duas coberturas e compartimentos inferiores, como é o caso dos termopares, dos fluxímetros, entre outros. Na zona este da moradia, em que na esteira da cobertura já tinha sido em 2010 aplicado, por cima da lã de rocha, o isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, colocaram-se os instrumentos indicados na Figura 5.38 e na zona oeste, sem este isolamento e com XPS aplicado na esteira, colocaram-se dois sensores de temperatura com *logger* incorporado de temperatura e humidade do ar (um na cobertura oeste e outro no quarto imediatamente por baixo) bem como três termopares em que o primeiro mediu a temperatura superficial do teto do quarto, o segundo mediu a temperatura superficial do XPS aplicado na esteira e o terceiro mediu a temperatura superficial inferior das telhas que constituem a vertente do lado oeste.

Numa segunda fase, de modo a permitir a ligação de mais instrumentação de medida na cobertura oeste, nomeadamente fluxímetros que pela reduzida extensão dos fios elétricos não podiam ser ligados ao *datalogger* colocado na cobertura este, e para suplantar alguns problemas técnicos, nomeadamente de vários períodos relativos à utilização de um só *datalogger* em que este equipamento desligava e nada registava (em que uma das possíveis causas foi a da existência de fios muito compridos no exterior para a ligação aos termopares da cobertura oeste, fios esses que em extensos períodos do dia ficavam sujeitos à ação direta do Sol) optou-se, como já foi indicado no capítulo V, pelo uso de dois *dataloggers*, com 16

canais analógicos e 2 de impulso de frequência, um em cada uma das coberturas isoladas termicamente da mesma forma seguida nas medições que utilizaram um único *datalogger*.

Numa terceira e última fase mantendo-se os dois *dataloggers* da fase anterior alterou-se somente o isolamento inserido na cobertura este, adicionando mais um sistema de isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, agora por baixo das vertentes, como se mostrou na Figura 5.13.

6.2.2 COMPARAÇÃO DAS SITUAÇÕES COM E SEM ISOLAMENTO TÉRMICO COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE USANDO UM SÓ DATALOGGER

Em relação aos resultados obtidos e devido a vários problemas técnicos ocorridos tanto nas medições com os sensores de temperatura e humidade com *loggers* incorporados, como com o *datalogger*, tiveram de seleccionar-se períodos e resultados que pudessem oferecer a garantia de poderem ser usados para a produção de conclusões.

Em relação aos resultados, no período entre 27/7/2011, 20h30min. e 3/8/2011, 11h20min. obtidos com sensores de temperatura e humidade com *loggers* incorporados, apresentam-se no Quadro 6.12 os seguintes valores médios.

Quadro 6.12
VALORES MÉDIOS DE TEMPERATURAS E HUMIDADES RELATIVAS DO AR DE 27/7/2011 A 7/8/2011

	Temp. ext (°C)	Temp. desvão 1 Este (°C)	Temp. quarto 1 Este (°C)	Temp. desvão 2 Oeste (°C)	Temp. quarto 2 Oeste (°C)	H.R. ext(%)
Valores médios	20,11	23,93	24,96	24,25	25,38	72,20

Pode, pois, verificar-se, que as temperaturas tanto no desvão como no quarto da zona oeste, em que não se procedeu à aplicação de isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, apresentaram valores um pouco superiores aos correspondentes da zona este em que o referido isolamento foi aplicado na laje de esteira. No entanto, as diferenças não são muito significativas, o que se pode explicar, para o caso dos desvãos de cobertura, pelo facto das dimensões destes não serem exatamente iguais, sendo até o oeste um pouco maior que o orientado a este bem como pelo facto que na cobertura este existem algumas telhas de vidro ao contrário da cobertura oeste em que todas as telhas são cerâmicas opacas.

Em relação aos resultados das temperaturas ocorridas nos quartos será importante evidenciar que a área de envidraçados em contacto com o exterior no quarto este é substancialmente maior do que no quarto oeste, o que obviamente implica maiores ganhos solares e como tal incrementos na temperatura interior.

No respeitante aos resultados do *datalogger* obtidos no período 27/7/2011, 20h30min. a 7/8, 20h40min apresenta-se no Quadro 6.13 os resultados dos valores máximos e médios atingidos pela temperatura superficial tanto nas vertentes como na esteira respeitantes às duas coberturas estudadas, sendo que em ambas, os sensores foram colocados sensivelmente na mesma posição.

Quadro 6.13
VALORES MÁXIMOS E MÉDIOS DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS ESTEIRAS E DAS VERTENTES DE 27/7/2011 A 7/8/2011

	Desvão 2 oeste Laje de Esteira Sem B.R (°C)	Desvão 2 oeste Vertente Sem B.R (°C)	Desvão 1 este Laje de Esteira Com B.R (°C)	Desvão 1 este Vertente Com B.R (°C)
Máximos absolutos	41,00	56,60	38,20	53,90
Médias	23,68	24,75	22,90	24,12

Verifica-se, pois, que na situação com isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade aplicado na esteira, a temperatura máxima nesta foi menor em 2,8°C e na vertente, na superfície inferior das telhas, foi menor em 2,7°C. Quanto à temperatura média, e na mesma situação, esta foi inferior em 0,8°C na esteira e menor em 0,6°C na vertente. Verifica-se, pois, em relação às temperaturas máximas atingidas nos dois desvãos a vantagem em aplicar o isolamento referido na esteira.

Usando, ainda, o *datalogger* no período 27/7/2011, 20h30min. a 7/8/2011, 20h40min., apresenta-se no Quadro 6.14 os resultados dos valores máximos e médios medidos pelos fluxímetros aplicados na cobertura este. Faz-se notar que, no que respeita especificamente ao fluxímetro que foi aplicado diretamente por cima do isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, no pavimento do desvão de cobertura, este foi recoberto por folha de alumínio igual ao do referido isolamento.

Quadro 6.14
VALORES MÁXIMOS E MÉDIOS DOS FLUXOS DE CALOR DE 27/7/2011 A 7/8/2011

	Fluxo Desvão 1 este Vertente W/m ²	Fluxo Desvão 1 este Laje de Esteira W/m ²
Máximos absolutos	45,00	12,00
Médias	0,08	-2,81

Para o período de 10/8/2011, 21h até 23/8/2011, 11h30min., embora em vários subperíodos intermédios não existissem registos devido a problemas do sistema de medição, apresenta-se no Quadro 6.15, para os subperíodos em que existiu registo de dados, os resultados relativos às temperaturas superficiais nos desvãos de cobertura e nos quartos que se encontram por baixo.

Quadro 6.15
VALORES MÁXIMOS E MÉDIOS DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DOS DESVÃOS DE COBERTURA E DOS QUARTOS DE 10/8/2011 A 23/8/2011

	Desvão 2 oeste Laje de Esteira Sem B.R. (°C)	Desvão 2 oeste Vertente Sem B.R. (°C)	Quarto 2 oeste Teto Sem B.R. (°C)	Desvão 1 este Laje de Esteira Com B.R. (°C)	Desvão 1 este Vertente Com B.R. (°C)	Quarto 1 este Teto Com B.R. (°C)
Máximos absolutos	36,50	47,70	26,40	32,20	46,10	26,00
Médias	24,20	24,10	25,40	23,90	23,30	25,10

Pode-se, assim, verificar que mesmo existindo algumas características diferenciadoras da zona oeste para a zona este da moradia, características essas que teoricamente provocam mais aquecimento da segunda zona face à primeira (como é o facto que existem mais janelas no quarto este do que no oeste), constata-se que o isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade na esteira da zona este permite, mesmo assim, a existência de temperaturas mais baixas. Em relação aos valores máximos da temperatura nos desvãos, regista-se que, no que respeita à situação com o referido isolamento, a temperatura superficial na laje de esteira foi mais baixa em 4,3°C e a temperatura superficial na vertente foi mais baixa em 1,6°C, do que na situação sem o mesmo. Quanto aos quartos o valor máximo da temperatura superficial no teto foi mais baixa 0,4°C na situação com isolamento térmico com

revestimento refletante de baixa emissividade relativamente à situação sem este isolamento. Em relação aos valores médios, e como seria de esperar, as diferenças são algo menores, verificando-se, pois, que a influência no quarto é praticamente inexistente.

Para o mesmo período e metodologia de análise, apresenta-se no Quadro 6.16 os resultados dos valores máximos e médios medidos pelos fluxímetros aplicados na cobertura este, em que o isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade está aplicado na respetiva laje de esteira por cima da lâ de rocha. Instalou-se, ainda, um outro fluxímetro entre o isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade e um conjunto de embalagens de cartão de alimentos líquidos, neste caso pacotes de leite UHT (tal e qual especificado na Figura 5.28) de forma a saber-se o fluxo de calor que passa por esta solução de isolamento.

Quadro 6.16
VALORES MÁXIMOS E MÉDIOS DOS FLUXOS DE CALOR DE 10/8/2011 A 23/8/2011

	Fluxo Desvão 1 este Pacotes de leite W/m ²	Fluxo Desvão 1 este Vertente W/m ²	Fluxo Desvão 1 este Laje de Esteira W/m ²
Máximos absolutos	9,00	20,00	11,00
Médias	-2,50	-4,90	-3,60

Dos resultados apresentados no quadro anterior, verifica-se a vantagem da utilização dos pacotes de leite pois o respetivo fluxo de calor máximo, que é descendente, foi de 81,8% do respetivo fluxo através da esteira revestida com os isolamentos térmicos já referidos (lã de rocha e isolamento revestido com película refletante de baixa emissividade). Também, em termos de fluxo de calor médio, em que se verificou que este foi ascendente, o uso dos pacotes de leite, permitiu que o respetivo valor fosse de 69,4% em relação à situação de somente uso de lâ de rocha e isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade em contacto com o ar do desvão. É óbvio que existe aqui uma grande influência dos espaços de ar dos pacotes, ainda por cima encerrados entre paredes com uma emissividade relativamente baixa.

Para o mesmo período de 10/8/2011 a 23/8/2011 teve-se a possibilidade de instalar no exterior um termoanemómetro para medir a temperatura e velocidade do vento no exterior e no desvão

de cobertura este (o que tem instalado na esteira o isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade) um termómetro de bolbo negro para medir a temperatura radiante desse espaço. Apresenta-se no Quadro 6.17 os valores máximos dos valores medidos dessas variáveis.

Quadro 6.17
VALORES MÁXIMOS DA TEMPERATURA E VELOCIDADE DO VENTO EXTERIOR E DA TEMPERATURA RADIANTE DO DESVÃO ESTE DE 10/8/2011 A 23/8/2011

	Temperatura exterior °C	Velocidade do vento m/s	Temperatura radiante Desvão 1 Este °C
Máximos absolutos	30,75	2,63	39,13

Comparando o valor máximo atingido pela temperatura radiante no desvão este com as temperaturas máximas atingidas nas vertentes e no pavimento desse mesmo espaço (Quadro 6.18), verifica-se que a primeira foi praticamente igual à média (39,2°C) das duas últimas.

O último período considerado ainda dentro da primeira fase de ensaios efetuados foi o de 26/8/2011, 7h30min. a 30/8/2011, 17h. No Quadro 6.18 apresenta-se os valores máximos absolutos das temperaturas superficiais obtidas nos desvãos e nos quartos bem como a temperatura radiante obtida no desvão este.

Quadro 6.18
VALORES MÁXIMOS E MÉDIOS DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS ESTEIRAS E DAS VERTENTES E DA TEMPERATURA RADIANTE NO DESVÃO ESTE DE 26/8/2011 A 30/8/2011

	Desvão 2 oeste Laje de Esteira Sem B.R. (°C)	Desvão 2 oeste Vertente Sem B.R. (°C)	Quarto 2 oeste Teto Sem B.R. (°C)	Desvão 1 este Laje de Esteira Com B.R. (°C)	Desvão 1 este Vertente Com B.R. (°C)	Quarto 1 este Teto Com B.R. (°C)	Desvão 1 este Temp. radiante Com B.R. (°C)
Máximos absolutos	29,70	44,20	23,30	26,50	42,90	22,00	31,08

Pela análise do quadro anterior, mais uma vez se verifica a vantagem da aplicação dos isolamentos térmico com revestimento refletante de baixa emissividade na esteira, realçando-se, neste caso, o facto da temperatura máxima atingida no teto dos quartos ser 1,3°C mais baixa. Também é relevante referir que desta vez a temperatura radiante máxima do desvão este já não é a média entre as temperaturas máximas da sua cobertura e pavimento (34,7°C),

notando-se que está mais próxima da temperatura do pavimento do que do teto, o que não deixará de ter a ver com o facto que a localização do bolbo estava substancialmente mais próxima do pavimento do que do teto.

6.2.3 COMPARAÇÃO COM E SEM ISOLAMENTO TÉRMICO COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE USANDO UM DATALOGGER EM CADA DESVÃO DE COBERTURA

Nesta análise começou-se por, no período compreendido entre 13/9/2011, 13h30min e 18/9/2011, 7h10min., voltar a comparar o comportamento da cobertura este, em que a esteira foi revestida por lã de rocha e isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, com o da cobertura oeste, com esteira revestida somente com XPS, de forma a não só verificar se os resultados são idênticos aos da fase anterior de ensaios, mas também o de possibilitar o uso de termofluxímetros também na cobertura oeste, situação que não foi possível, como já foi explicado, nos testes empreendidos com o uso de um só *datalogger*. Constatou-se efetivamente, que a nível dos valores máximos e médios das temperaturas obtidas, os resultados, muito idênticos aos anteriores, permitiram retirar as mesmas conclusões.

Nesta fase de medições existiu a disponibilidade de utilização de vários sensores com *logger* incorporado e com capacidade para medir, além da temperatura, também a humidade do ar. Assim, apresenta-se no Quadro 6.19 os resultados dos máximos absolutos e as médias da humidade relativa do ar tanto nos desvãos de cobertura, como nos quartos, bem como no ar exterior.

Quadro 6.19
VALORES MÁXIMOS E MÉDIOS DAS HUMIDADES RELATIVAS DO AR DOS QUARTOS, DESVÃOS DE COBERTURA E EXTERIOR DE 13/9/2011 A 18/9/2011

	Desvão 2 oeste Sem B.R (%)	Quarto 2 oeste Sem B.R (%)	Desvão 1 este Com B.R (%)	Quarto 1 este Com B.R (%)
Máximos absolutos	87,10	72,40	87,10	78,10
Médias	60,49	66,52	63,15	72,04

Pelos resultados do quadro anterior, pode-se concluir que as humidade relativas máximas nos quartos foram inferiores às correspondentes dos desvãos de cobertura, mas já em termos médios passou-se exatamente o contrário. Os valores elevados das humidades relativas dos quartos estarão relacionados com a diminuta ventilação destes espaços devido ao facto que durante os respetivos períodos de medição se mantiveram as portas e as janelas fechadas. Em termos comparativos das duas zonas da moradia, evidencia-se que o quarto este, integrando isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade aplicado superiormente ao teto, apresentou tanto humidades relativas máximas, como médias, superiores às do quarto oeste, sem o referido isolamento na esteira.

No respeitante à comparação, para o mesmo período, dos fluxos de calor que passam tanto nas vertentes como na esteira das duas coberturas, apresenta-se no Quadro 6.20, os respetivos valores máximos, mínimos e médios.

Quadro 6.20
VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS DOS FLUXOS DE CALOR NOS DESVÃOS DE COBERTURA DE 13/9/2011 A 18/9/2011

	Desvão 2 oeste Laje de Esteira Sem B.R. (W/m ²)	Desvão 2 oeste Vertente Sem B.R. (W/m ²)	Desvão 1 este Laje de Esteira Com B.R. (W/m ²)	Desvão 1 este Vertente Com B.R. (W/m ²)
Mínimos absolutos	-10	-19	-7	-21
Máximos absolutos	15,00	49,00	11,00	50,00
Médias	-1,2	1	-1,5	-0,9

Constata-se, pois, que os fluxos máximos, que atravessaram as esteiras, e que são descendentes, atingiram o maior valor no desvão oeste, sem isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, sendo que o uso deste isolamento, no desvão este, permitiu a diminuição para 73% desse valor. No respeitante aos valores mínimos, que são ascendentes, verifica-se que os maiores fluxos em valor absoluto são igualmente existentes no desvão oeste, sem o referido isolamento, sendo que o uso deste, no desvão este, permitiu a diminuição para 70% desse valor. Estes resultados são indicativos que no caso de se instalarem equipamentos de refrigeração nos quartos, tendencialmente, o respeitante ao quarto este, que superiormente ao teto possui um isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, será de menor potência. No entanto, alerta-se para que durante a noite, nos períodos em que o quarto atinge maiores temperaturas do que o desvão, o isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade limita igualmente a

passagem do fluxo de calor, o que no caso de não existir uma boa ventilação noturna no quarto pode provocar em alguns períodos temperaturas incomodativas. Estes resultados a que se chegou para o período noturno de verão podem, com aproximação, ser extrapolados para as situações de inverno, mesmo durante o dia, em que a temperatura interior do quarto é maior que a temperatura do desvão e do exterior, sendo que o referido isolamento provoca, também nesta situação, diminuição de fluxo de calor, ou seja diminuição das perdas térmicas.

Finalmente, no período compreendido entre 19/9/2011, 7h e 26/9/2011, 18h50min., realizou-se um último estudo, em que, desta vez, a cobertura este, além de possuir um sistema de isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade na laje de esteira, cumulativamente também possui o mesmo sistema por debaixo das vertentes, ou seja colocou-se por debaixo das telhas, e fixo à estrutura de suporte das mesmas, o mesmo tipo de isolamento que já se tinha colocado por cima da laje de esteira. Entre outras vantagens esta solução permite diminuir bastante a quantidade de pó que cai no isolamento térmico, com revestimento refletante de baixa emissividade, da esteira, já que a maior parte do pó é proveniente das telhas e dos espaços entre elas e fica praticamente todo retido no isolamento por debaixo da vertente que possui igualmente uma superfície de baixa emissividade na sua face inferior. Importa evidenciar que a colocação do referido isolamento por debaixo das vertentes diminui o caudal de ventilação do desvão, que se processa naturalmente por entre as telhas marselha. No entanto, a ventilação não foi completamente anulada pois deixaram-se algumas aberturas (juntas em que não se aplicou a fita autocolante entre os vários elementos do material de isolamento).

Apresentam-se no Quadro 6.21 os valores mínimos, máximos e médios das temperaturas do ar nos desvãos de cobertura e nos quartos das duas zonas da moradia em estudo.

Quadro 6.21
VALORES MÍNIMOS, MÁXIMOS E MÉDIOS DAS TEMPERATURAS DO AR DOS QUARTOS E DESVÃOS DE COBERTURA DE 19/9/2011 A 26/9/2011

	Desvão 2 Oeste Sem B.R (°C)	Quarto 2 Oeste Sem B.R (°C)	Desvão 1 Este Com B.R (°C)	Quarto 1 Este Com B.R (°C)
Mínimos absolutos	10,99	20,95	12,55	19,81
Máximos absolutos	34,01	23,24	27,12	22,86
Médias	20,68	22,28	21,13	21,35

Dos resultados anteriores, constata-se as relevantes vantagens da aplicação cumulativa do isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade, além de na laje de esteira, também nas vertentes, por de baixo das telhas, pois a temperatura máxima no desvão este foi menor em 6,9°C do que a do desvão oeste, ou seja, na situação sem o referido isolamento. Para se ter uma melhor noção da evolução das temperaturas do ar ao longo do subperíodo de 19/9/2011, 7h a 21/9/2011 às 10h30min., apresenta-se o respetivo gráfico na Figura 6.13.

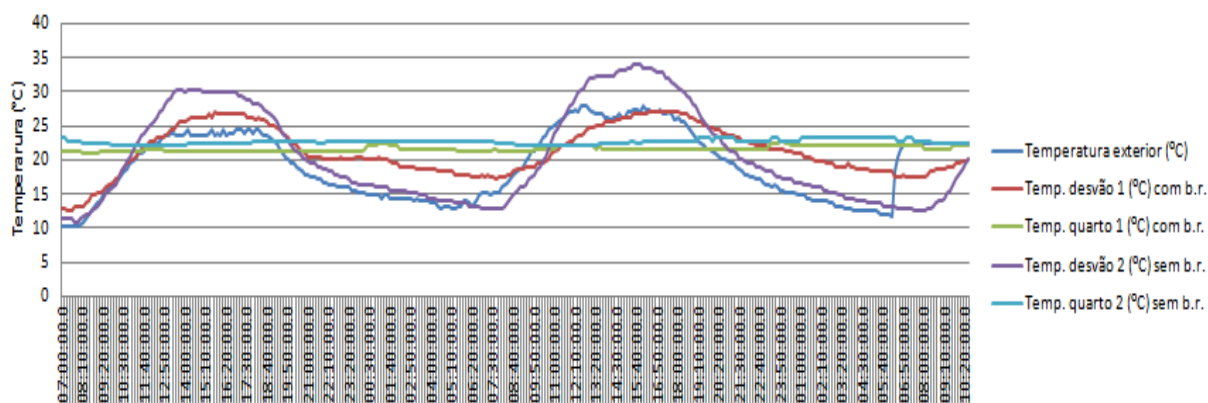


Figura 6.13

EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS DO AR EXTERIOR, DESVÃOS DE COBERTURA E QUARTOS DE 19/9/2011 a 21/9/2011

Conclui-se, pois, do gráfico anterior que a aplicação do isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade permitiu diminuir as amplitudes térmicas em especial no respeitante ao desvão de cobertura, ou seja, com o uso deste isolamento o desvão não atingiu temperaturas tão elevadas nem tão baixas. Também, para o período compreendido entre 19/9/2011, 7h e 26/9/2011, 18h50min., apresenta-se no Quadro 6.22 os resultados dos mínimos, máximos e as médias da humidade relativa do ar tanto nos desvãos de cobertura como nos quartos.

Quadro 6.22

VALORES MÍNIMOS, MÁXIMOS E MÉDIOS DAS HUMIDADES RELATIVAS DO AR DOS QUARTOS E DESVÃOS DE COBERTURA DE 19/9/2011 A 26/9/2011

	Desvão 2 Oeste Sem B.R (%)	Quarto 2 Oeste Sem B.R (%)	Desvão 1 Este Com B.R (%)	Quarto 1 Este Com B.R (%)
Mínimos absolutos	23,60	59,90	28,40	62,10
Máximos absolutos	75,00	67,20	69,50	70,20
Médias	61,46	65,02	61,73	69,18

Verifica-se, pois, que em termos de humidades relativas máximas o uso do isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade fez diminuir o seu valor no desvão em 5,5% e aumentar no quarto em 3%. Já em relação aos valores médios, verifica-se que a humidade relativa no quarto este, por baixo da cobertura com este isolamento, que funciona igualmente como barreira pára-vapor, foi superior em 4,2% ao que se passa no quarto oeste, sem aplicação do referido isolamento. É fundamental, mais uma vez, referir que a justificação da maior humidade relativa no quarto este não se pode basear unicamente na existência da barreira para-vapor, mas também pelo efeito da menor pressão de saturação relativa a este quarto, devido ao facto da respetiva temperatura do ar interior ser ligeiramente menor. Para se ter uma melhor noção da evolução das humidades relativas do ar ao longo do subperíodo de 19/9/2011, 7h a 21/9/2011 às 10h30min., apresenta-se o respetivo gráfico na Figura 6.14.

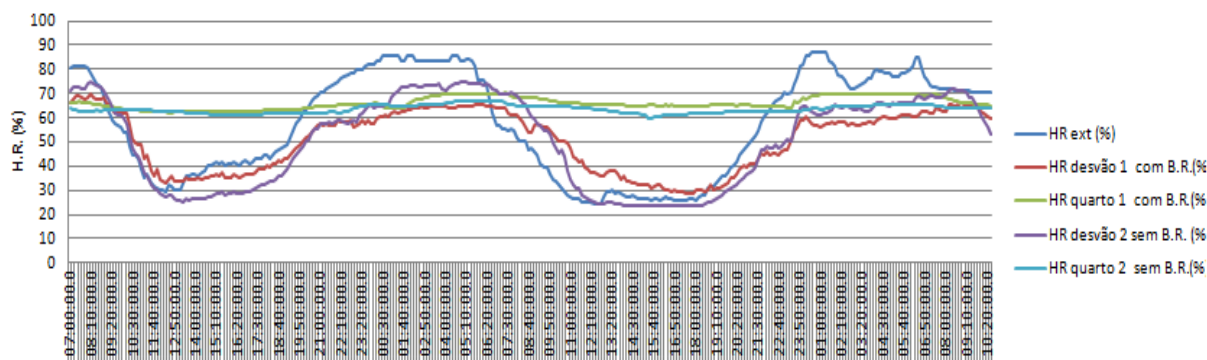


Figura 6.14
EVOLUÇÃO DAS HUMIDADES RELATIVAS DO AR EXTERIOR, DOS DESVÃOS DE COBERTURA E QUARTOS DE 19/9/2011 a 21/9/2011

Verifica-se, pois, que é no exterior que se atingiram os valores mais elevados da humidade relativa do ar, sendo que essa humidade transmite-se mais facilmente para o desvão sem isolamento térmico, que também funciona como barreira para-vapor, que atingiu, deste modo, valores de humidade relativa maiores do que o desvão com barreira para-vapor. Já quanto aos quartos, atingiu-se valores superiores da humidade relativa no que por cima, no respetivo desvão, apresenta o referido isolamento. Mais uma vez se alerta, que outra das razões que justifica esta situação nos quartos é a maior pressão de saturação do vapor no quarto oeste devido às maiores temperaturas do ar que aí ocorrem.

Continuando com a análise do período compreendido entre 19/9/2011, 7h e 26/9/2011, 18h50min., apresenta-se no Quadro 6.23 os valores máximos das temperaturas superficiais,

medidas com termopares, dos pavimentos e coberturas dos desvãos, bem como do teto dos quartos. No respeitante às temperaturas superficiais do desvão este, com isolamento térmico refletante de baixa emissividade, foi adicionalmente medida a temperatura superficial atingida na face inferior deste isolamento localizado sob a vertente oeste da respetiva cobertura.

Quadro 6.23
VALORES MÁXIMOS DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DOS QUARTOS E DESVÃOS DE
COBERTURA DE 19/9/2011 A 26/9/2011

	Desvão 2 oeste Laje de esteira Sem B.R (°C)	Desvão 2 oeste Vertente /Telha Sem B.R (°C)	Quarto 2 oeste Teto Sem B.R (°C)	Desvão 1 este Laje de Esteira Com B.R (°C)	Desvão 1 este Vertente/ Telha Com B.R (°C)	Desvão 1 este Vertente/ B.R. Com B.R (°C)	Quarto 1 este Teto Com B.R (°C)
Máximos Absolutos	31,50	42,20	23,50	26,20	42,80	32,30	23,10

Dos resultados anteriores, pode-se concluir que para uma muito semelhante temperatura máxima superficial em cada uma das coberturas, o pavimento do desvão que possui isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade, apresentou uma temperatura superficial máxima inferior em 5,3°C à correspondente da cobertura que não integra os referidos isolamentos.

Também, é relevante referir, que a temperatura máxima na superfície inferior do isolamento térmico refletante de baixa emissividade instalada nas vertentes da cobertura, logo por debaixo das telhas, é inferior em 10,5°C à que ocorre acima na superfície inferior das telhas, sendo pois evidente a grande vantagem da colocação deste isolamento. Já no respeitante à temperatura superficial do teto do quarto, a diferença em termos de temperatura máxima não é muito significativa (0,4°C) o que denota, como já foi abordado anteriormente, que existiram outros fatores preponderantes nesta temperatura, que não somente a temperatura da superfície superior da esteira.

No respeitante à comparação, para o mesmo período, dos fluxos de calor que passaram tanto nas vertentes como na esteira das duas coberturas, apresenta-se no Quadro 6.24 os respetivos valores máximos, assim como o valor máximo da radiação solar total.

Quadro 6.24

VALORES MÁXIMOS DOS FLUXOS DE CALOR NOS DESVÃOS DE COBERTURA DE 19/9/2011 A 26/9/2011

	Fluxo Desvão 2 oeste Vertente/ Telha Sem B.R. (W/m ²)	Fluxo Desvão 2 oeste Laje de Esteira Sem B.R. (W/m ²)	Fluxo Desvão 1 este Vertente/ Telha Com B.R. (W/m ²)	Fluxo Desvão 1 este Vertente/ B.R. Com B.R. (W/m ²)	Fluxo Desvão 1 este Laje de Esteira Com B.R. (W/m ²)
Máximos Absolutos	50,00	14,00	47,00	9,00	6,00

Verifica-se, pois, que em termos de fluxos de calor máximos, no caso da existência de isolamento térmico refletante de baixa emissividade, o valor que passa na superfície superior da esteira foi de 12,8% do valor que passa na superfície inferior das telhas. Já na situação sem o referido isolamento esse valor foi de 28%. Também é relevante referir que a aplicação do isolamento térmico refletante de baixa emissividade nas vertentes, permitiu que o fluxo que passa na superfície inferior deste isolamento fosse 19,1% do que passou imediatamente acima na superfície inferior das telhas. Quanto ao isolamento térmico refletante de baixa emissividade na esteira, note-se que o fluxo que passou na sua superfície superior foi de 66,7% do que passou na superfície inferior do mesmo tipo de isolamento instalado nas vertentes. Com estes resultados fica evidente a grande vantagem da aplicação do referido isolamento, sobretudo se instalado nas vertentes dos desvãos de cobertura.

Importa referir que todos os ensaios realizados em 2011 foram efetuados após a limpeza do isolamento térmico com revestimento refletante de baixa emissividade instalado em 2010 na esteira da cobertura este, pois verificou-se que, após um ano, já existia uma quantidade não negligenciável de pó e outros detritos que iriam interferir negativamente nas propriedades refletantes e emissivas do referido isolamento (Figura 6.15).

**Figura 6.15**

PÓ ACUMULADO NO ISOLAMENTO TÉRMICO COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE APLICADO NA ESTEIRA E CORRESPONDENTE LIMPEZA

CAPÍTULO VII

METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E OBTENÇÃO DE DADOS BASE

7.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM O PROGRAMA INFORMÁTICO CAPSOL V4.0W

O programa informático CAPSOL v 4.0W calcula as transferências de calor tanto em regime estacionário como dinâmico entre zonas térmicas (multizona) de edifícios, incluindo cálculos da transferência de calor por condução, convecção e radiação infravermelha, estes últimos pela utilização de fatores de vista para pontos e superfícies. As zonas podem ser internas ou externas. As zonas internas, ao contrário das zonas externas, têm volume e por isso uma capacidade térmica. A capacidade térmica é a componente acumulativa do sistema (Rodrigues; Piedade e Braga, 2009) de zona (Cz). A densidade e o calor específico do ar de cada zona bem como dos elementos da sua envolvente são definidos na entrada de dados do programa.

A base da simulação do CAPSOL (Physibel, 2002) pode ser explicada em cinco esquemas base:

- 1º) Fluxos de calor por condução, convecção e radiação infravermelha entre zonas.

O programa CAPSOL é baseado num sistema constituído por resistências térmicas (componente dissipativa do sistema térmico) e de capacidades térmicas (componente acumulativa do sistema térmico), que fazendo uma analogia a um sistema elétrico, estes são respetivamente as resistências e os condensadores elétricos (Rodrigues; Piedade e Braga, 2009). Esta analogia entre sistemas térmicos e sistemas elétricos é a base do método de Bruckmayer para quantificar a capacidade térmica efetiva dos elementos de construção

(Rodrigues; Piedade e Braga, 2009). Na Figura 7.1 é apresentado um esquema representativo da metodologia de consideração dos fluxos de calor considerada no CAPSOL.

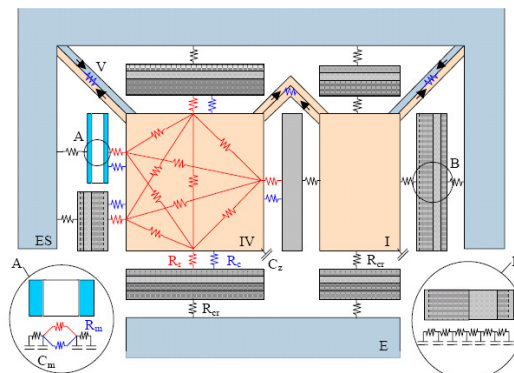


Figura 7.1
FLUXOS DE CALOR INTERZONAS POR CONDUÇÃO, CONVECÇÃO E RADIAÇÃO
INFRAVERMELHA NO CAPSOL
(PHYSIBEL, 2002)

Pode-se assim verificar pelo esquema da Figura anterior, de que cada elemento construtivo é representado por uma série de resistências (R) e capacidades térmicas (C_m). As cavidades em elementos construtivos podem ser simuladas usando uma resistência convectiva paralela a uma resistência radiativa (A) ou utilizando uma resistência térmica equivalente (B).

As zonas podem ser internas ou externas. As zonas internas (I e IV) têm um volume e como tal uma capacidade térmica de zona (C_z), enquanto as zonas externas (E e ES) não. Nas zonas internas os fluxos superficiais de calor por convecção e radiação infravermelha podem ser acoplados (I) pela utilização de resistências térmicas conjuntas à radiação e convecção (R_{cr}) ou separadas (IV) usando resistências térmicas à convecção (R_c) e resistências à radiação infravermelha baseadas em fatores de vista (R_r). As zonas externas podem ser uma única zona solar (ES) ou zonas em que não atue a radiação solar (E), como é o caso do solo. Na Figura 7.2 apresenta-se as zonas inseridas num dos cenários considerados, em que se pode constatar que se utilizaram uma zona ES, outra E e duas IV.

Mina Beja c LR 4 cm esteira leve com 4 zonas jan fec isol ext														
Zone	Name	Type	V [m³]	pc [J/m²K]	Steady-state calculation							Dynamic calculation		
					θ-w [°C]	Qfree-w [W]	n-w [1/h]	θ-s [°C]	Qfree-s [W]	n-s [1/h]	Ventilation zone	θ [°C]	Ir [W/m²]	Qfree [W]
1	Exterior	ES	-	1200	5	-	-	31	-	-	-	T01	I00	-
2	Desvão Co	IV	23.47	1200	10	0	2	30	0	2	Exterior	-	-	P00
3	Quarto	IV	60.9	1200	18	84	0.4	25	84	0.4	Exterior	-	-	P00
4	Interior	E	-	1200	18	-	-	25	-	-	-	T02	-	-

Figura 7.2
DEFINIÇÃO DAS ZONAS TÉRMICAS NO CAPSOL

- 2º) Condução, convecção e radiação solar e infravermelha através dos elementos construtivos (Figura 7.3).

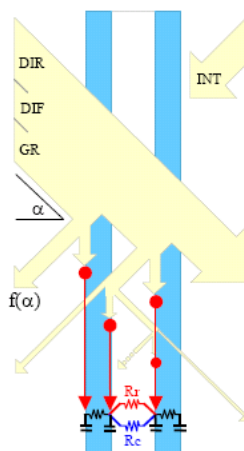


Figura 7.3
CONDUÇÃO, CONVECÇÃO, RADIAÇÃO INFRAVERMELHA E SOLAR NO CAPSOL
(PHYSIBEL, 2002)

As cavidades, por exemplo as lâminas de ar dos envidraçados duplos, podem, como já foi referido, ser simuladas usando uma resistência térmica convectiva (R_c) paralela à resistência térmica radiativa (R_r) ou então uma resistência térmica equivalente às duas. A radiação solar que incide num elemento construtivo exterior é a soma da radiação direta (DIR), difusa (DIF) e proveniente da reflexão do solo (GR) e é dependente do respetivo ângulo de incidência (α). É possível no CAPSOL definir-se obstáculos (como é exemplo um outro edifício vizinho) que limitam a radiação solar incidente em toda a superfície exterior do edifício ou que realizam essa limitação para uma única parede ou janela (como são exemplo as palas e os beirais de cobertura).

No interior das zonas são consideradas múltiplas reflexões internas nas respetivas superfícies interiores (INT). A radiação que vem das superfícies dos elementos construtivos adjacentes, bem como a radiação proveniente do exterior, é considerada, só que não depende dos ângulos de incidência/reflexão, pois estas reflexões são consideradas difusas (radiação difusa).

- 3º) Processamento da radiação solar através das zonas (Figura 7.4).

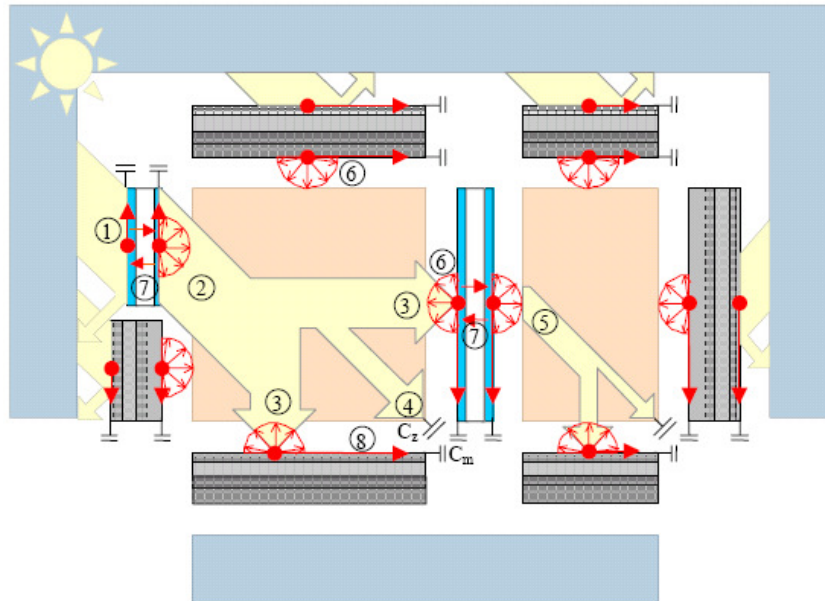


Figura 7.4
PROCESSAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR ATRAVÉS DAS ZONAS TÉRMICAS NO CAPSOL
(PHYSIBEL, 2002)

A radiação solar que entra numa zona (2) proveniente de um elemento construtivo, em contacto com o exterior, como é o caso de um envidraçado (1), é distribuída proporcionalmente pelas superfícies (3) envolventes de cada zona e a parte remanescente é transmitida à respetiva capacidade térmica do ar dessa zona (4). As reflexões da radiação solar nas superfícies dos elementos construtivos interiores são consideradas difusas (6). Estas reflexões internas, sendo interações difusas em ambientes fechados, são consideradas e mensuradas através de princípios de radiosidade usando fatores de vista superficiais. Em superfícies interiores transparentes, como é o caso de envidraçados, também existem estas reflexões difusas, cuja radiação pode depois passar (7) para outra zona interna (5). Assim, a radiação solar que incide numa superfície exterior, como é o caso de um envidraçado, é distribuída através dos nós de capacidade térmica dessa superfície, os nós de capacidade térmica dos elementos construtivos interiores C_m (8) e os nós de capacidade térmica dessa zona C_z (4) e parcialmente retorna para as zonas exteriores.

- 4º) Condições fronteira ou de contorno, definidas em alguns dos nós e entre nós, aplicadas à rede das resistências e capacidades térmicas (Figura 7.5).

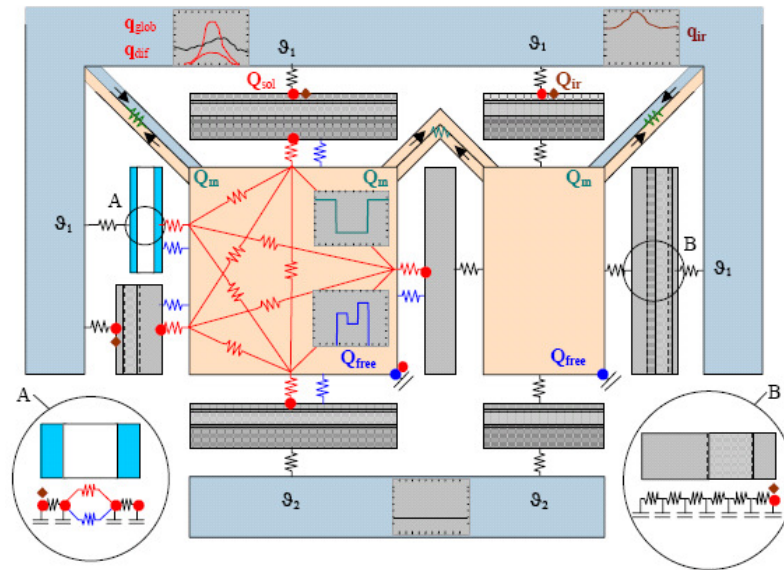


Figura 7.5
CONDIÇÕES FRONTEIRA NO CAPSOL
(PHYSIBEL, 2002)

Estas condições fronteira são:

- Temperaturas das zonas (θ_1 , θ_2) aplicadas aos respectivos nós representativos;
- As potências do aquecimento solar (Q_{sol}) aplicadas na parede e nos nós das zonas obtidas pelo processador solar e decorrente dos dados solares, nomeadamente a radiação horizontal total (q_{glob}) e a difusa (q_{dif});
- Calor dissipado (Q_{free}) pelos ocupantes, iluminação e equipamentos, calor esse transmitido ao nó da respetiva zona;
- A potência da radiação infravermelha proveniente do céu (Q_{ir}), obtida da radiação infravermelha (q_{ir}) aplicada nos nós relativos às superfícies externas;
- Os fluxos internos de massa de ar entre zonas (Q_m), que podem ser originados por ventilação natural ou mecânica.

As condições fronteira ou de contorno são função do tempo, como é o caso dos dados climáticos (temperatura e radiação solar), em que o CAPSOL usa ficheiros TRY (*Test Reference Year*) de várias partes do mundo, ou o caso das temperaturas de zonas interiores adjacentes que podem ser representadas por funções constantes, sinusoidais ou em escada.

- 5º) Controladores de temperatura para arrefecimento e aquecimento, que podem funcionar por controlo da potência, das trocas de massas de ar e dos dispositivos de proteção solar em especial dos envidraçados (Figura 7.6).

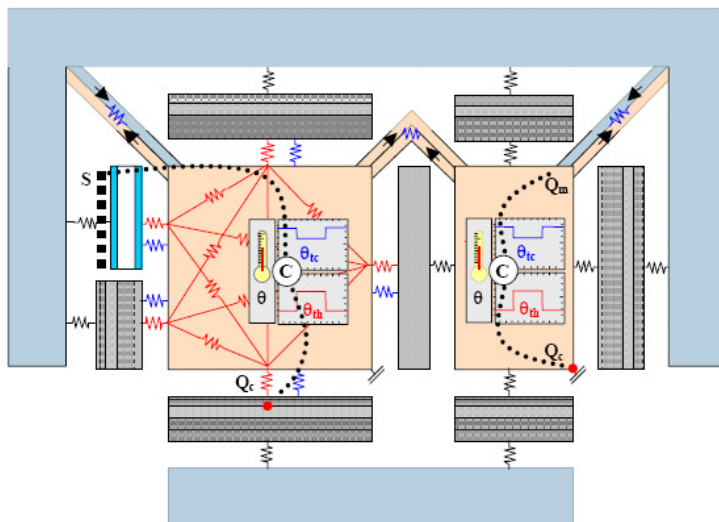


Figura 7.6

CONTROLADORES DE TEMPERATURA PARA ARREFECIMENTO E AQUECIMENTO NO CAPSOL
(PHYSIBEL, 2002)

O CAPSOL permite controlar a temperatura dos nós das zonas e das superfícies de elementos construtivos. Se estas temperaturas não obedecem às margens definidas pelo utilizador, uma ação de controlo despoleta-se, que pode consistir em:

- Uma potência (Q_c) positiva no caso do aquecimento e negativa no caso do arrefecimento pode ser aplicada em qualquer zona ou nó de parede da rede, permitindo tal simular radiadores, pavimentos radiantes de aquecimento ou arrefecimento, entre outros;
- Uma troca de massas de ar (Q_m) entre a zona considerada e outra zona pode ser considerada, permitindo tal simular sistemas de ventilação;
- Um dispositivo de proteção solar (S) pode ser aplicado num elemento transparente como é o caso de um envidraçado. Isto é realizado pela substituição desse elemento por um outro com diferente reflexão, transmissão e absorção solar.

As capacidades térmicas armazenam cargas térmicas, sendo comparáveis, no âmbito da analogia elétrica, com os condensadores que armazenam carga elétrica. Uma zona externa pode ser uma zona solar. Nas zonas internas, as transferências de calor com as superfícies dos elementos construtivos, por convecção e radiação infravermelha podem ser consideradas

conjuntamente (R_{cr}) ou separadas (R_c e R_r). O CAPSOL considera ainda a ventilação entre as diversas zonas, através de fluxos de massa bidirecionais, assumindo valores constantes de renovações por hora. Todas estas análises são realizadas unidimensionalmente (1D). É de realçar que o CAPSOL v 4.0W não considera a humidade relativa e a produção de vapor no interior das várias zonas.

No cálculo em regime dinâmico, um sistema de equações diferenciais de balanço energético é produzido e resolvido para cada intervalo de tempo considerado, através de um método das diferenças finitas, nomeadamente através do método de Cranck-Nicolson, que normalmente é usado para resolver numericamente a equação do calor (equação de derivadas parciais que é também chamada de equação da difusão térmica) e equações diferenciais parciais similares. Já o cálculo em estado estacionário, pode ser usado para estimar os consumos para aquecimento ou para arrefecimento.

O CAPSOL integra quatro módulos, que trabalham conjuntamente durante a definição do problema, do cálculo e da apresentação dos resultados:

- Módulo de entrada de dados;
- Módulo de cálculo;
- Módulo de edição de funções;
- Módulo de edição dos elementos construtivos. O editor de elementos construtivos inclui o cálculo do fator de transmissão solar.

Os subprogramas/módulos contidos na pasta PHYSIBEL, criada a quando da instalação e que são necessários para o programa principal do CAPSOL, listam-se a seguir:

- “CAPSOL data”, que trabalha com os ficheiros de dados;
- “CAPSOL walltypes”, que integra ficheiros com as características dos elementos construtivos. O termo parede (“Wall”) é genericamente usado para paredes, pavimentos, tetos, envidraçados (elementos opacos, transparentes e mistos) sendo que cada “Wall” é caracterizada termicamente por uma série de resistência térmicas (R) e capacidades térmicas (C_m). As cavidades destes elementos construtivos podem ainda ser simuladas usando uma resistência

térmica convectiva paralela à resistência radiativa. De notar que os elementos construtivos separam zonas e podem ser externos ou internos;

- “CAPSOL functions”, que permite a consideração de dados horários (temperatura, radiação solar total, difusa e direta na horizontal) de vários países e regiões;
- “CAPSOL reports”, onde se produzem os relatórios com os resultados das diversas simulações. Os resultados são apresentados em RTF (acrónimo de Rich Text Format) num modo compatível com o MS Word, transferindo-os depois facilmente para o MS Excel;
- “Materials”, onde está disponível uma base de dados com as características de diversos materiais de construção;
- Manuais, onde está disponível um manual de apoio ao programa.

Em “Program settings” no menu “file” definimos várias parâmetros fundamentais de configuração do CAPSOL, como é o caso dos coeficientes h_e e h_i ($W/(m^2C)$), do produto da densidade pelo calor específico, das unidades de tempo (s, min, h e dias). Estes parâmetros são usados como valores iniciais em novos projetos (Figura 7.7).

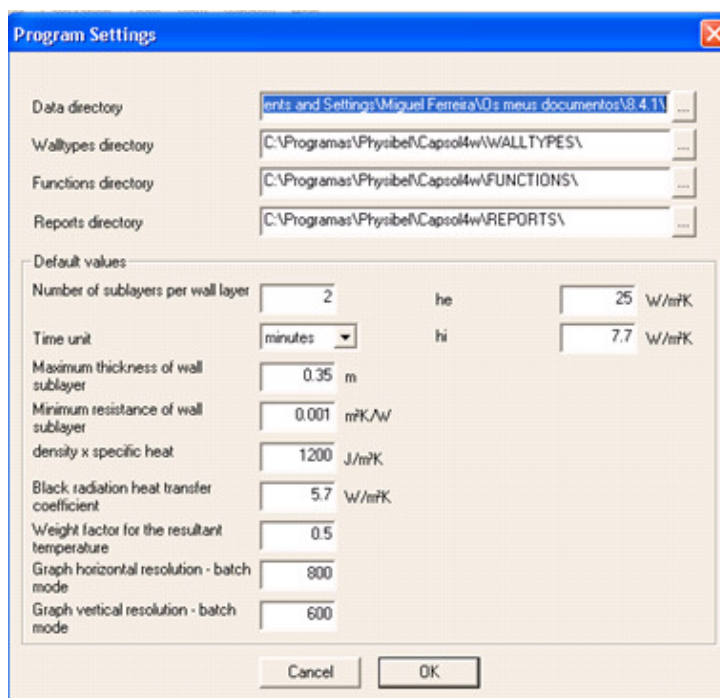


Figura 7.7
CONFIGURAÇÃO DE VÁRIOS PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DO CAPSOL

A introdução de dados é realizada por intermédio de ficheiros que podem ser acedidos do ficheiro menu pelo comando (“*import dat file*”). Existem funções de referência para folhas de dados, sendo funções temporais, podendo ser definidas num ficheiro ou num quadro de dados. São ficheiros ASC II. O subprograma “*function editor*” edita estas funções como é o caso dos ficheiros de dados climáticos (Figura 7.8).

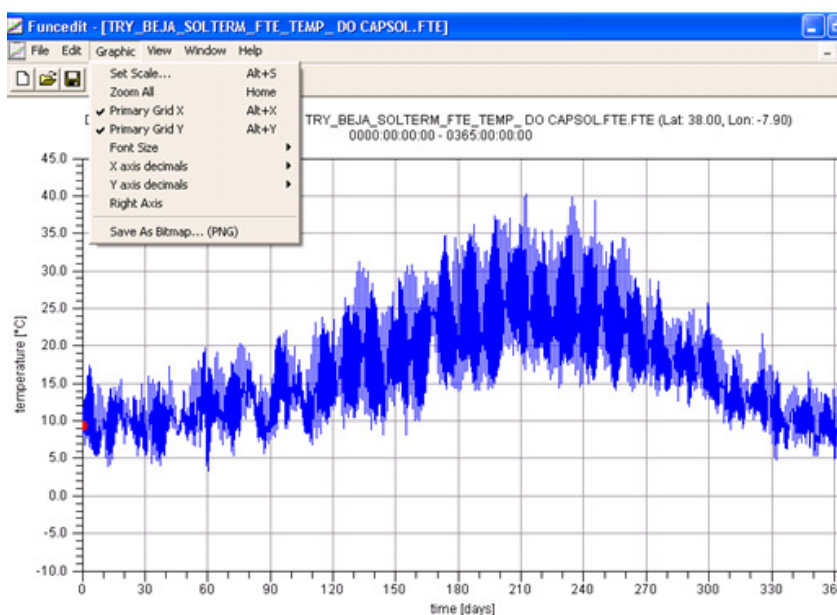


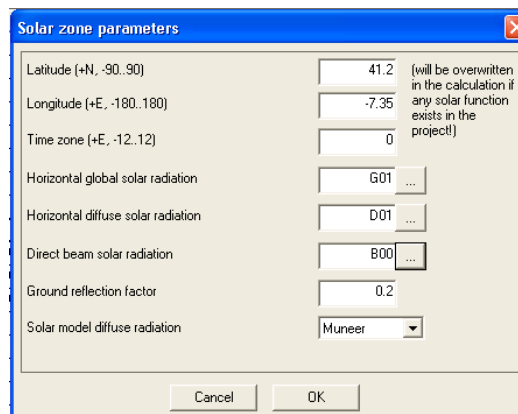
Figura 7.8

DADOS CLIMÁTICOS DE BEJA EDITADOS EM GRÁFICO ATRAVÉS DO EDITOR DE FUNÇÕES DO CAPSOL

Na opção “*function references*” do menu “*edit*”, insere-se, entre outros aspetos, os ficheiros dos dados climáticos, que no caso do CAPSOL, podem ser os seguintes:

- T - Temperatura exterior;
- G - Radiação solar global em superfície horizontal;
- D - Radiação difusa em superfície horizontal;
- B – Radiação solar direta.

No entanto, e caso se conheça T, G e D, já não é necessário importar B. Assim, os ficheiros ativos contêm a menção 01 e os inativos a menção 00. No menu “*Edit*”, em “*Solar zone parameters*”, escolhe-se os ficheiros climáticos relativos à radiação solar e que irão servir para o cálculo pretendido (Figura 7.9).



Solar zone parameters

Latitude (+N, -90..90) (will be overwritten in the calculation if any solar function exists in the project!)

Longitude (+E, -180..180)

Time zone (+E, -12..12)

Horizontal global solar radiation ...

Horizontal diffuse solar radiation ...

Direct beam solar radiation ...

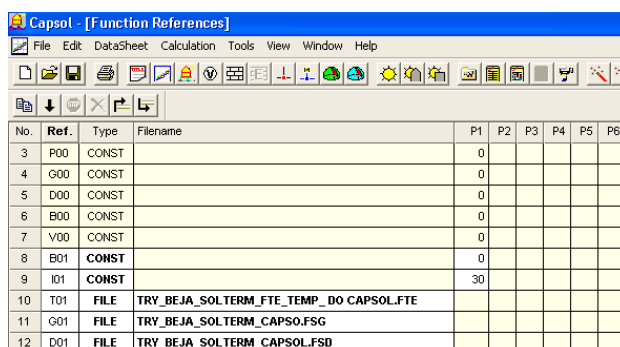
Ground reflection factor

Solar model diffuse radiation

Cancel OK

Figura 7.9
ESCOLHA DOS PARÂMETROS SOLARES A USAR PELO CAPSOL

Na Figura 7.10 mostra-se um exemplo dos dados climáticos importados de ficheiros climáticos TRY para o CAPSOL, de modo a se proceder aos cálculos de transferências de calor.



No.	Ref.	Type	Filename	P1	P2	P3	P4	P5	P6
3	P00	CONST		0					
4	G00	CONST		0					
5	D00	CONST		0					
6	B00	CONST		0					
7	V00	CONST		0					
8	B01	CONST		0					
9	I01	CONST		30					
10	T01	FILE	TRY_BEJA_SOLTERM_FTE_TEMP_DO CAPSOL.FTE						
11	G01	FILE	TRY_BEJA_SOLTERM_CAPSO.FSG						
12	D01	FILE	TRY_BEJA_SOLTERM_CAPSOL.FSD						

Figura 7.10
IMPORTAÇÃO DOS DADOS CLIMÁTICOS PARA O CAPSOL

Na definição das lâminas ou caixas de ar de elementos construtivos é usado o nº de Nusselt (Nu) que é igual a:

$$Nu = \frac{\text{Transferência de calor por convecção}}{\text{Transferência de calor por condução}} \quad [7.1]$$

A condução pode ser considerada um caso particular da convecção, ou seja, pode ser considerada a convecção de um fluido em repouso. Então:

- Se $Nu = 0$ não haverá convecção, apenas condução, como se o fluido estivesse completamente em repouso;
- Se $Nu = 1$ a transferência de calor por convecção é igual à transferência de calor por condução.

Na Figura 7.11 exemplifica-se a inserção dos dados de um elemento construtivo (envidraçado) no subprograma “*WallTypeEdit*”, em que se pode ver a coluna do número de Nusselt (Nu).

WallTypeEdit - [Envidraçados sem proteção]

File

Edit

Edit Layer

View

Window

Help

</

Figura 7.11

DADOS INSERIDOS NO SUBPROGRAMA DO CAPSOL DE CARATERIZAÇÃO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Como se pode constatar na Figura anterior, outros parâmetros essenciais que este programa tem em consideração para cada superfície é o fator de emissividade da radiação infravermelha (ϵ), o fator de reflexão (ρ) e o fator de absorção (α). Também é relevante referir que ao se colocar no editor de elementos construtivos (“*Wall Type Editor*”) camadas gasosas conjuntamente com as sólidas, o CAPSOL calcula a resistência térmica (R) da cavidade gasosa, tendo em conta a emissividade das superfícies das camadas sólidas que delimitam a camada de gás (Physibel, 2010_a).

De toda a descrição efetuada relativamente a esta ferramenta informática CAPSOL V4.0 W, e tendo em conta o funcionamento do seu processador solar bem como o uso de fatores de vista pontuais e superficiais, tudo isto num regime dinâmico ou transiente multizona, e a consideração da emissividade, refletância e absorptância das superfícies, realça-se a sua especial adequação para o cálculo das transmissões de calor por radiação, essencial no estudo do comportamento de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade (ITRBEs), daí a opção pela utilização deste programa de simulação no âmbito do presente trabalho. A própria Physibel aborda (Physibel, 2010_b) os métodos existentes nos seus programas informáticos, para especificamente simularem o comportamento de cavidades, em que as superfícies que as delimitam são constituídas por materiais de baixa emissividade, como é o caso das folhas de alumínio polidas, sendo que em todos esses métodos se usam fórmulas matemáticas integrantes da norma EN ISO 6946 (CEN, 2007).

7.2 OBTENÇÃO DOS DADOS CLIMÁTICOS USADOS NO CAPSOL V4.0W

7.2.1 DADOS CLIMÁTICOS DE LOCAIS DE PORTUGAL

Nas simulações numéricas efetuadas para o território de Portugal, foram tidas em contas três localidades, representativas de cada uma das zonas climáticas de verão consideradas pela legislação em vigor (Direção Geral de Energia e Geologia, 2013): Beja (Zona V3); Maia (Zona V2) e Montalegre (Zona V1). A razão da escolha destas localidades teve como fundamento o seguinte: Beja por se tratar da localidade Portuguesa em que, segundo os ficheiros utilizados, se atingem temperaturas máximas mais elevadas, a Maia pelo facto de ser a localidade em que está implantada a casa que foi alvo de monitorização experimental (ver Capítulos V e VI) e Montalegre por se tratar de uma das zonas que no inverno atingem temperaturas muito baixas, permitindo, assim, realizar igualmente estudos de comportamento térmico em período de inverno particularmente frio.

Os dados climáticos base destas três localidades foram obtidos dos ficheiros TRY (série Horária Meteorológica de Referência) existentes no programa informático SOLTERM V5.1.0 (LNEG, 2009). O formato destes ficheiros incluem os seguintes dados, cada um relativo a cada uma das respetivas colunas de valores: mês, dia do mês, hora (tempo solar), temperatura ambiente (°C), humidade relativa (%), radiação solar horária global e difusa celeste na horizontal (W/m²). Apresentam-se no Quadro 7.1 algumas das características relativas a cada um dos três locais considerados nas simulações, retiradas dos ficheiros TRY do SOLTERM.

Quadro 7.1
ALGUMAS CARATERÍSTICAS DOS LOCAIS DE PORTUGAL CONSIDERADOS NAS SIMULAÇÕES

Local	Coordenadas (°)	Temperatura máxima anual (°C)	Temperatura média Anual (°C)	Temperatura mínima anual (°C)	Radiação solar horizontal global máxima (W/m ²)	Radiação solar difusa horizontal máxima (W/m ²)
Montalegre (V1)	+41,8N -7,8O	31,4	12,6	-0,8	1011	405
Maia (V2)	+41,2N -8,6O	30,1	14,2	1,7	993	443
Beja (V3)	+38,0N -7,9O	40,2	16,5	3,3	1016	410

Para, através dos ficheiros TRY do SOLTERM, se produzirem ficheiros climáticos com formato compatível com a leitura através do CAPSOL, foi necessário empreender os passos seguintes:

- 1º) Através do SOLTERM, guardar série horária de referência TRY e obter o ficheiro texto disponibilizado por este programa informático;
- 2º) Abrir o MS Excel e desde aí abrir o ficheiro texto referido em 1;
- 3º) No assistente de importação do MS Excel, deixar estar a opção “delimitado”, de forma a que o assistente de textos determine que os dados são delimitados;
- 4º) No assistente de importação do MS Excel, nos delimitadores, clicar em “tabulação”, de forma a provocar a separação dos dados em colunas autónomas;
- 5º) No assistente de importação do MS Excel, optar por formato de dados da coluna geral;
- 6º) Produzir três ficheiros Excel, cada um com uma coluna de dados separados de temperatura (extensão FTE), de radiação solar global (extensão FSG) e de radiação solar difusa (extensão FSD). Deve-se nesta fase ter o cuidado de passar vírgulas para pontos no que concerne aos números com casas decimais;
- 7º) Abrindo cada um dos três ficheiros MS Excel referidos anteriormente, grava-se no formato “texto com tabulações”;
- 8º) Abre-se cada um destes ficheiros com o subprograma “*Function editor*” do CAPSOL, considerando a opção “todos os ficheiros”. Depois, em “*parameters*” do menu de edição, opta-se pelo tipo de dados de acordo com o que se pretende FTE, FSG e FSD e procede-se à respetiva gravação. De acordo com as indicações de Physibel (2010) é necessário no início dos dados de cada ficheiro acrescentar uma linha com o mesmo valor da 2ª linha. A razão de tal é que o tempo e os dados solares não estão completamente em concordância pois o 1º tempo considerado nos ficheiros TRY é 1:00 de 1 de Janeiro, mas no CAPSOL é 0:00. Já no fim do ficheiro, no dia 31/12 retirou-se a última linha;
- 9º) É necessário no CAPSOL colocar uma obstrução de horizonte de modo a que a radiação solar ao fim da tarde e ao início da manhã, pela sua perpendicularidade às paredes exteriores, não causem valores irrealistas. Assim, ao colocar uma obstrução de horizonte com ângulo de altura solar entre 0º e 5º para todos os azimutes possíveis (Figura 7.12), os resultados obtidos acabam por não apresentar discrepâncias.

Building Sun Obstacles				
No.	Azi-min [°]	Azi-max [°]	Alt-min [°]	Alt-max [°]
1	-180.0	180.0	0.0	5.0

Figura 7.12

OBSTRUÇÃO DE HORIZONTE CONSIDERADA EM TODAS AS SIMULAÇÕES NO CAPSOL

Com esta consideração não existe, assim, radiação solar direta relativa a posições baixas do sol, situação esta, para o qual o CAPSOL origina desvios em relação ao que deveria ser. Para a maioria das situações de edifícios simulados, tal obstrução acaba por corresponder à realidade, com exceção de edifícios que não tenham qualquer obstrução de horizonte, como é o caso de certas casas à beira mar que recebem perfeitamente o sol poente, sendo que neste caso esta obstrução considerada vai alterar um pouco a radiação solar que na realidade o edifício recebe;

- 10º) É ainda necessário realizar sempre um controlo da qualidade dos ficheiros climáticos (Physibel, 2010), pois em alguns casos é necessário aplicar uma longitude artificial de modo que a radiação (em Wh/m^2) incidente numa superfície vertical orientada rigorosamente a este dê o mesmo que rigorosamente a oeste. Tal tem de acontecer pois nas simulações realizadas pelo CAPSOL está-se a trabalhar com o tempo solar, sendo que as 12 h são o meio-dia solar, dividindo rigorosamente o dia solar em duas partes iguais. Foi o caso da Maia, em que com o uso da longitude real (-8,6ºO) tal provocou, no caso simulado no CAPSOL, produzido para a verificação da qualidade dos dados climáticos, um desvio de 5,4% (Figura 7.13) superior aos 3% considerado como admissível.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Maia -8,6, G-D		Com sombra de horizonte de 5°			Fuso 0					
2	Month	South	West	North	East	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Temperature		
3	[.]	q. [Wh/m²]	q. [Wh/m²]	q. [Wh/m²]	q. [Wh/m²]	q. [Wh/m²]	q. [Wh/m²]	q. [Wh/m²]	° [°C]		
4	1	73737	27761	13440	31792	47974	50894	26195	8,9		
5	2	80036	34371	16619	44353	63808	67004	31111	9,5		
6	3	93370	54451	25135	63894	100255	104807	45963	11,1		
7	4	90891	72730	35529	77895	136842	142976	63193	12,8		
8	5	81720	88449	46706	89508	166532	173609	73562	15,3		
9	6	74496	92036	52200	94567	179170	186116	71940	18,2		
10	7	86546	98423	53999	109421	197522	204766	75268	20,1		
11	8	99446	95224	43939	102290	177981	184535	67641	19,9		
12	9	87949	68523	29990	70940	122064	127350	53736	18,7		
13	10	101577	55267	22371	50543	89417	93521	40837	15,7		
14	11	81999	38523	15253	32536	56811	59858	29068	11,4		
15	12	77314	28838	12099	27460	44951	47546	23038	9,1		
16		1039071	754596	367280	795199	1383327	1442982	601552	14,2		105,4

Figura 7.13

VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DOS DADOS CLIMÁTICOS PARA A MAIA CONSIDERANDO A LONGITUDE REAL

Deste modo e para diminuir a discrepância apontada para os níveis admissíveis, e após várias

tentativas, considerou-se o uso da longitude artificial igual a $-7,35^{\circ}\text{O}$. Para esta situação, originou-se no caso simulado no CAPSOL, produzido para a verificação da qualidade dos dados climáticos (Physibel, 2010), um desvio de 0,2% (Figura 7.14) muito inferior aos 3% considerado como admissível.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Maia -7,35, G-D	Com sombra de horizonte de 5°			Fuso -0,5833 na fórmula		-7,35		Diferença de 1,25° (0,0833h - 5 min)		
2	Month	South	Vest	North	East	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Temperature	
3	[.]	q, [Wh/m²]	q, [Wh/m²]	q, [Wh/m²]	q, [Wh/m²]	q, [Wh/m²]	q, [Wh/m²]	q, [Wh/m²]	q, [Wh/m²]	θ [°C]	
4	1	73758	26558	13443	30953	48002	50505	26339	8,9		
5	2	80028	35445	16634	43040	63879	67056	31144	9,5		
6	3	93399	56082	25142	62023	100301	104530	45980	11,1		
7	4	90919	74564	35536	75895	136841	142978	63394	12,8		
8	5	81720	90630	46710	87360	166534	173614	73565	15,3		
9	6	74462	94247	52961	92340	179185	186132	71956	16,2		
10	7	66596	100894	53849	106575	197566	204815	75311	20,1		
11	8	59473	97931	43884	93477	177939	184537	67644	19,9		
12	9	57946	70410	29988	68916	122058	127358	53743	18,7		
13	10	101555	56359	22356	46975	69383	93472	40806	15,7		
14	11	82038	39723	15246	31584	58773	59837	29054	11,4		
15	12	77288	29681	12094	26835	44927	47527	23029	9,1		
16		1039202	775105	367031	773763	1383427	1443061	601625	14,2		99,8

Figura 7.14

VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DOS DADOS CLIMÁTICOS PARA A MAIA CONSIDERANDO A LONGITUDE ARTIFICIAL

7.2.2 DADOS CLIMÁTICOS DE LOCAIS DA COMUNIDADE DE PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA (CPLP)

Foram igualmente considerados dois locais pertencentes a Países da CPLP, que por terem climas muito quentes, bem como por possuírem grande proximidade histórica e cultural a Portugal, o autor achou bastante relevante estudar o comportamento da aplicação de ITRBEs nos edifícios desses locais. Assim, escolheu-se Petrolina no Brasil e Dili em Timor Leste. Petrolina, pertencente ao Estado de Pernambuco, apresenta um clima tropical semiárido, tal e qual se pode ver na Figura 7.15.



Figura 7.15

CLIMA DE PETROLINA

(Estados e Capitais do Brasil.com. [Em linha]. Disponível em <<http://www.estadosecapitaisdobrasil.com/mapas-do-brasil/>>)

Já em relação a Dili (Timor Leste), este apresenta um clima tropical húmido como se pode constatar na Figura 7.16.

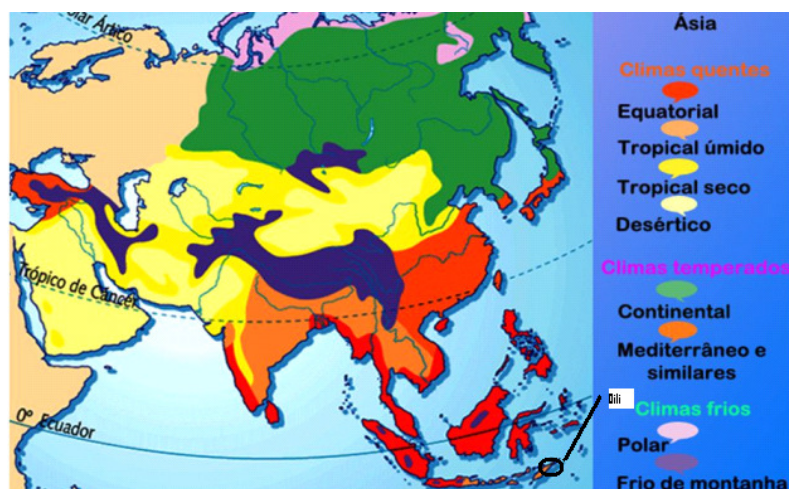


Figura 7.16
CLIMA DE DILI

(Valdinei. [Em linha]. Disponível em:< <http://slideplayer.com.br/slide/4871809/>>)

Os dados climáticos base destas duas localidades foram obtidos dos ficheiros gerados pelo programa METEONORM v 4.0.

Apresenta-se no Quadro 7.2 algumas das características relativas a cada um dos dois locais considerados nas simulações, retiradas dos ficheiros do METEONORM.

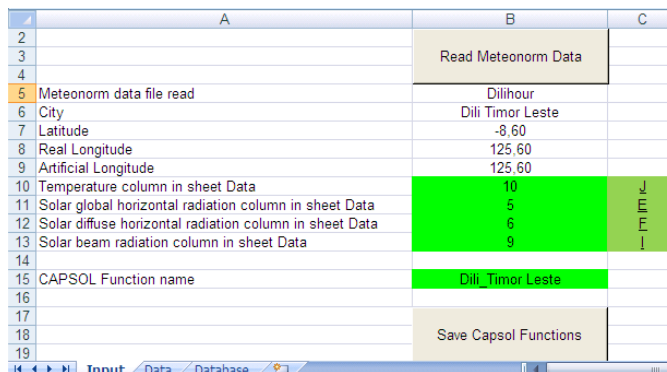
Quadro 7.2
ALGUMAS CARATERÍSTICAS DOS DOIS LOCAIS DA CPLP CONSIDERADOS NAS SIMULAÇÕES

Local	Coordenadas (°)	Temperatura máxima anual (°C)	Temperatura média anual (°C)	Temperatura mínima anual (°C)	Radiação solar horizontal global máxima (W/m ²)	Radiação solar difusa horizontal máxima (W/m ²)
Petrolina (Brasil)	-9,4S -40,5O	41,5	26,4	15,1	1118	547
Dili (Timor Leste)	-8,6S 125,6E	38,8	27,8	17,5	1102	544

Verifica-se, pois, que embora Petrolina atinja temperaturas máximas superiores, Dili tem menor amplitude térmica anual, atingindo temperaturas médias e mínimas superiores.

Para, através dos ficheiros gerados pelo METEONORM, se produzirem ficheiros climáticos com formato compatível com a leitura através do CAPSOL, foi necessário empreender os passos seguintes (Physibel, 2010):

- 1º) Através do METEONORM gerar os ficheiros .dat com o nome do local pretendido;
- 2º) Através do ficheiro clin_convert_02 e do separador “Input” e após se ativar as macros, clica-se em “Read Meteonorm Data” e abre-se o ficheiro produzido no passo 1 (Figura 7.17);



	A	B	C
2			
3		Read Meteonorm Data	
4			
5	Meteonorm data file read	Dilihour	
6	City	Dili Timor Leste	
7	Latitude	-8,60	
8	Real Longitude	125,60	
9	Artificial Longitude	125,60	
10	Temperature column in sheet Data	10	F T E
11	Solar global horizontal radiation column in sheet Data	5	
12	Solar diffuse horizontal radiation column in sheet Data	6	
13	Solar beam radiation column in sheet Data	9	
14			
15	CAPSOL Function name	Dili_Timor Leste	
16			
17		Save Capsol Functions	
18			
19			

Figura 7.17
USO DO MENU “INPUT” DO FICHEIRO CLIN_CONVERT_02

- 3º) No separador “Data” do ficheiro clin_convert_02 aparecem automaticamente os dados do ficheiro do METEONORM separados em colunas no formato MS Excel;
- 4º) Voltar novamente ao menu “Input” e clicar em “Save Capsol Functions” (Figura 7.17) e após isso a folha de cálculo clin_convert_02 produz um a um os 4 ficheiros climáticos (FTE, FSG, FSD e FSB) que podem ser lidos no CAPSOL, sendo que o FSB (radiação solar direta na horizontal) não foi utilizado pois não é necessário quando se utiliza FSG e FSD;
- 5º) Aplicar os passos 9 e 10, descritos em 7.2.1, na produção de ficheiros de leitura pelo CAPSOL através do SOLTERM V5.0, ou seja, a inclusão de obstruções de horizonte e o uso do ficheiro de verificação da qualidade dos ficheiros climáticos de modo a verificar se é possível utilizar-se a longitude real ou, se ao contrário, é necessário aplicar-se uma longitude artificial.

7.3 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA EMISSIVIDADE DE SUPERFÍCIES DE MATERIAIS

Um dos parâmetros fundamentais para os estudos empreendidos no âmbito deste trabalho, e que, como já foi referido, é solicitado pelo CAPSOL, é a emissividade (ϵ) das superfícies dos

materiais de construção. É também relevante referir que este parâmetro ε é essencial para caraterizar o comportamento dos ITRBEs.

Para determinar experimentalmente a emissividade das superfícies dos materiais seguiu-se a norma ASTM C1371 (ASTM, 2015), tendo para tal sido utilizado um emissómetro modelo AE1 da Devices & Services Company, Dallas, EUA, cuja peça essencial é o detetor (Figura 7.18).



Figura 7.18
DETETOR DO EMISSÓMETRO AE1
(Devices & Services Company, 2011)

Antes de começar a medir a emissividade de superfícies de materiais é necessário ligar o aquecimento da base onde as amostras de materiais são colocadas. A base em causa aquece à temperatura de 82°C. Depois, é necessário realizar o ajuste do dispositivo através de duas amostras de material, cuja emissividade é conhecida e que se pousam na base aquecida colocando previamente uma ou duas gotas de água para que o contacto seja mais uniforme e que, deste modo, o aquecimento seja realizado por toda a superfície. A amostra de alta emissividade ($\varepsilon = 0,88$) é de alumínio preto anodizado infundido em teflon e como tal antes de realizar qualquer medição foi ajustado o equipamento para este valor da emissividade da referida amostra (Devices & Services Company, 2011) (Figura 7.19).



Figura 7.19
AJUSTE DO EMISSÓMETRO PARA A AMOSTRA DE $\varepsilon = 0,88$

Depois desta fase foi necessário repetir a operação, mas agora utilizando uma amostra de baixa emissividade ($\epsilon = 0,05$), conhecida, que é constituída por latão niquelado (Figura 7.10).

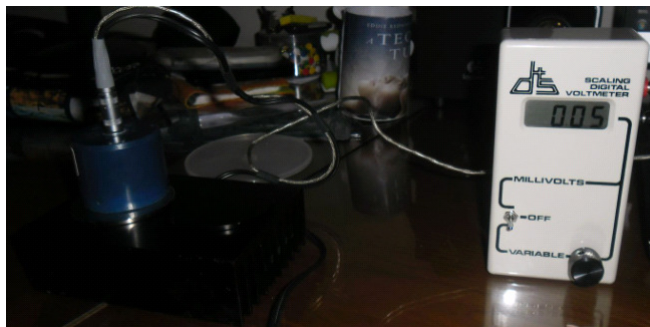


Figura 7.20
AJUSTE DO EMISSÓMETRO PARA A AMOSTRA DE $\epsilon = 0,05$

Depois, deve-se novamente repetir a operação para a amostra de alta emissividade de forma a confirmar se continua a dar o valor de 0,88. Caso já não dê esse valor é necessário realizar novo ajustamento e por aí adiante até se estabilizar a medição com o valor correto das emissividades das duas amostras que fazem parte do equipamento oriundo dos EUA.

Após esta sequência de operações, o autor deste trabalho procedeu à medição de emissividade da superfície de uma série de materiais que integram as simulações executadas no CAPSOL, desde logo a superfície do ITRBE usado já nos ensaios experimentais, com o objetivo principal de verificar a influência do pó na respetiva emissividade. Assim, e em primeiro lugar, mediu-se a emissividade da superfície superior do ITRBE aplicado na esteira, que como se pode constatar pela análise visual “in situ” é relevante a quantidade de pó e sujidades acumulados após cerca de 4 anos de deposição (Figura 7.21).

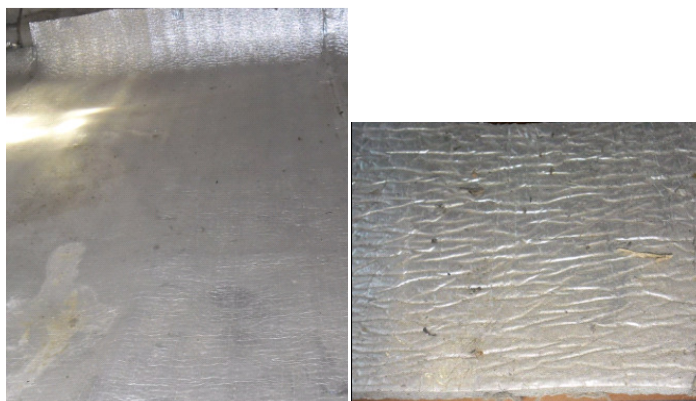


Figura 7.21
ASPETO DO PÓ E SUJIDADE ACUMULADOS NA ESTEIRA E RESPETIVA AMOSTRA PARA DETERMINAÇÃO DA EMISSIVIDADE

Após o ensaio de determinação da emissividade da superfície da amostra anterior, chegou-se à conclusão de que o respetivo valor passou de 0,06 (valor declarado pelo fabricante e comprovado experimentalmente no âmbito do presente trabalho) para 0,29 (Figura 7.22).

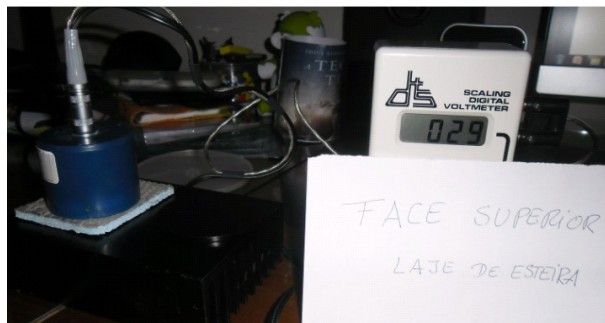


Figura 7.22

MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,29 PARA A SUPERFÍCIE SUPERIOR DO ITRBE APLICADO DURANTE 4 ANOS NA ESTEIRA

Igualmente se retiraram amostras do ITRBE (Figura 7.23) aplicado sob as vertentes da cobertura (telhas apoiadas em estrutura de madeira) sendo que visivelmente foi notória a diferença entre a face superior – à esquerda na Figura 7.23 - (repleta de pó e sujidade) e a face inferior – à direita na Figura 7.23 - (praticamente como nova, sem pó e sujidades).



Figura 7.23

AMOSTRAS DO ITRBE APLICADO SOB AS VERTENTES DA COBERTURA

Após a determinação da emissividade da superfície superior do ITRBE sob as vertentes da cobertura, concluiu-se de que o respetivo valor passou de 0,06 para 0,38 (Figura 7.24).



Figura 7.24

MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,38 PARA A SUPERFÍCIE SUPERIOR DO ITRBE APLICADO DURANTE 4 ANOS SOB AS VERTENTES DA COBERTURA

Já após o ensaio de determinação da emissividade da superfície inferior do ITRBE sob as vertentes da cobertura, chegou-se à conclusão de que o respectivo valor passou então unicamente de 0,06 para 0,07 (Figura 7.25).



Figura 7.25

MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,07 PARA A SUPERFÍCIE INFERIOR DO ITRBE APLICADO DURANTE 4 ANOS SOB AS VERTENTES DA COBERTURA

É relevante referir que à luz da Regulamentação em vigor (Direção Geral de Energia e Geologia, 2013_a) e tendo em conta os resultados obtidos, com pó e sujidade, na faces superiores do ITRBE usado sobre a esteira e sob as vertentes da cobertura, conclui-se que já não se pode considerar que estas superfícies sejam de baixa emissividade pois ultrapassam o valor limite de 0,2.

De seguida, o autor realizou a determinação da emissividade de superfícies de outros materiais isolantes, tendo chegado à conclusão de que os que ensaiou e cujas superfícies são de plástico aluminizado, e não de alumínio puro muito polido (como é o ITRBE usado como base deste estudo e que apresenta uma emissividade de 0,06), apresentam emissividades superiores a 0,2, não podendo assim à luz da legislação em vigor serem considerados ITRBEs.

Nas Figuras 7.26 e 7.27, apresentam-se alguns desses materiais ensaiados e os respetivos resultados da emissividade das respetivas superfícies.



Figura 7.26

MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,56 PARA A SUPERFÍCIE DE PLÁSTICO ALUMINIZADO



Figura 7.27
MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,38 PARA A SUPERFÍCIE DE PLÁSTICO ALUMINIZADO

Igualmente o autor determinou a emissividade da superfície de materiais que se usam no dia a dia, a maioria como embalagens de artigos alimentares, e que num enquadramento ambiental e de economia, poderiam ser reutilizados na constituição de ITRBEs para edifícios.

Assim, começou-se por analisar as embalagens tipo Tetrapak[®], muito usadas para embalar leite, refrigerantes e outros produtos alimentares líquidos. Numa 1^a fase abriu-se e planificou-se um pacote de leite de forma a ensaiar a respetiva superfície interior que é constituída por alumínio revestido por duas camadas de polietileno, tendo-se obtido o valor de 0,29 para ϵ (Figura 7.28).

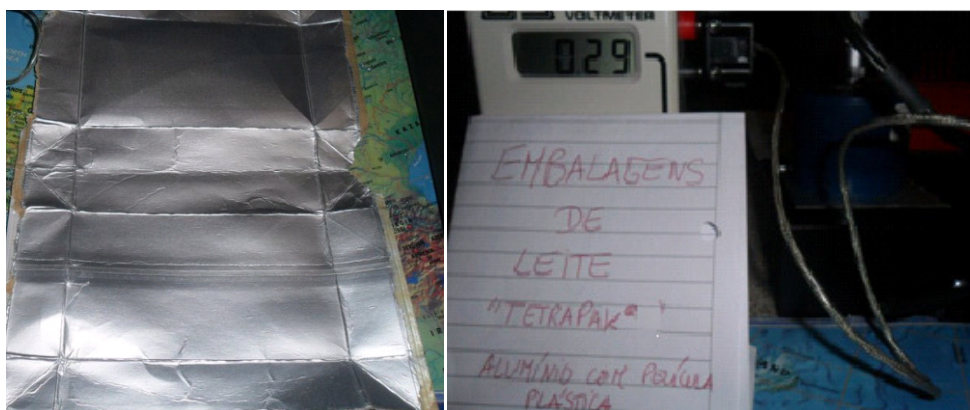
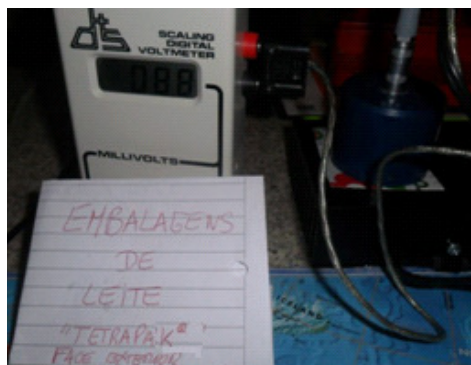


Figura 7.28
MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,29 PARA A SUPERFÍCIE INTERIOR DAS EMBALAGENS TIPO TETRAPAK[®]

Por comparação, mediu-se igualmente a emissividade da superfície exterior das embalagens tipo Tetrapak[®], tendo-se obtido o valor de 0,88 para ϵ (Figura 7.29).

**Figura 7.29**

MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,88 PARA A SUPERFÍCIE EXTERIOR DAS EMBALAGENS TIPO TETRAPAK®

Para maximizar o poder refletante de baixa emissividade da superfície interior destas embalagens, o autor retirou o revestimento plástico do alumínio, através da colocação, durante cerca de um minuto, das embalagens abertas e planificadas, e com a superfície interior virada para cima, num forno a lenha. Igualmente se constatou que a superfície exterior de papelão e plástico também saiu facilmente, ficando a folha de alumínio perfeitamente individualizada.

Na Figura 7.30 é bem evidente a diferença do alumínio sem nada a revesti-lo com a situação inicial dos revestimentos de polietileno.

**Figura 7.30**

ALUMÍNIO DAS EMBALAGENS TIPO TETRAPAK® E COMPARAÇÃO COM A SITUAÇÃO DE REVESTIMENTO COM POLIETILENO

De seguida, procedeu-se à determinação da emissividade da folha de alumínio referida anteriormente e obteve-se o valor de 0,05 para ϵ (Figura 7.31).

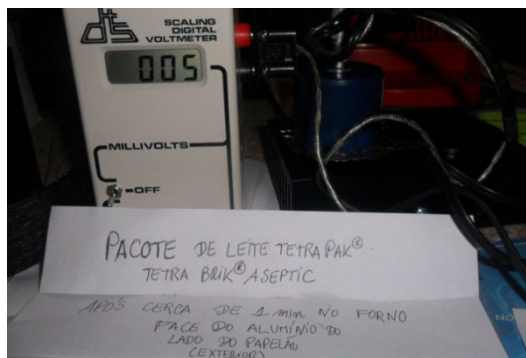


Figura 7.31
MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,05 PARA A FOLHA DE ALUMÍNIO DAS EMBALAGENS TIPO TETRAPAK®

De seguida, mediu-se a emissividade das folhas de alumínio que são comercializadas para embrulhar alimentos sólidos, tendo-se chegado a valores de 0,03 para a superfície mais brilhante e 0,04 para a menos brilhante (Figura 7.32).



Figura 7.32
MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,03 E 0,04 PARA AS FOLHAS DE ALUMÍNIO PARA EMBRULHAR ALIMENTOS

Igualmente se mediu a emissividade das embalagens de bolachas e chegou-se a obter num caso o valor de 0,17 para ϵ (Figura 7.33).

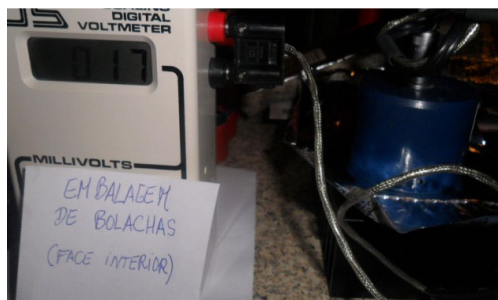


Figura 7.33
MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE 0,17 PARA AS EMBALAGENS DE EMBRULHAR BOLACHAS

Por fim, mediram-se, ainda, as emissividades de superfícies de materiais correntes da construção civil (telhas, rebocos pintados, madeiras, vidro, entre outros) materiais esses que foram considerados nas simulações numéricas realizadas e que deste modo acabam por ficar termicamente melhor caracterizados. No respeitante a materiais de grande dimensão e com superfícies irregulares (curvilíneas, por exemplo) foi necessário empreender um procedimento de ensaio específico, usando um adaptador com fole.

De seguida, exemplifica-se o procedimento seguido para a medição da emissividade da superfície de telhas (Devices & Services Company, 2011). Como primeiro passo, colou-se (Figura 7.34) numa zona da telha fita autocolante de alumínio (em que previamente tinha sido obtido para a sua superfície um ϵ de 0,07) e noutra zona fita isolante adesiva preta de PVC (em que previamente tinha sido obtido para a sua superfície um ϵ de 0,86).

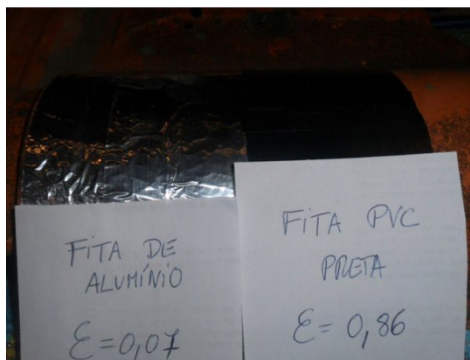


Figura 7.34

PREPARAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DA EMISSIVIDADE DE TELHAS CERÂMICAS

Após o uso de uma ventoinha para uniformizar a temperatura na zona onde o ensaio é realizado (que obviamente é fora da base aquecida) e com a montagem no detetor do emissómetro, de um adaptador com fole, ajusta-se em primeiro lugar o emissómetro para o valor conhecido do ϵ na fita autocolante de alumínio (Figura 7.35).



Figura 7.35

AJUSTE DA EMISSIVIDADE PARA O VALOR 0,07 DA FITA DE ALUMÍNIO APLICADA NA TELHA

Depois, repetiu-se a mesma operação para a fita preta de PVC (Figura 7.36).



Figura 7.36

AJUSTE DA EMISSIVIDADE PARA O VALOR 0,86 DA FITA DE PVC APLICADA NA TELHA

Após este procedimento voltou-se a medir a emissividade da fita de alumínio para verificar se continuava a dar o mesmo valor inicial (0,07). Não dando, deve-se realizar novamente o ajuste e proceder sequencialmente da mesma forma até as emissividades dos dois materiais estabilizarem nos valores corretos anteriormente determinados.

Faz-se notar que esta fita de alumínio com valor da emissividade igual a 0,07, determinado experimentalmente, é exatamente a mesma fita autocolante que se usou para colocar as sobreposições das mantas do isolamento térmico refletante de baixa emissividade (ITRBE) usadas nos ensaios experimentais no âmbito do presente trabalho.

Por fim, e após todos os passos anteriores, foi possível medir a emissividade da superfície da telha tal e qual se mostra na Figura 7.37, chegando-se ao valor de 0,88.



Figura 7.37

MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DA SUPERFÍCIE DA TELHA

CAPÍTULO VIII

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

8.1. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS *IN SITU* COM OS OBTIDOS PELO CAPSOL

No âmbito deste trabalho, ao pretender-se estudar o uso de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade (ITRBEs) em diversos cenários, por forma a constatar-se o melhor uso que se pode conferir nos edifícios a estas soluções de isolamento, foi inicialmente realizada uma comparação entre os resultados obtidos através das medições *in situ* no edifício monitorizado (ver Capítulo VI) e os obtidos pela utilização do programa CAPSOL, inserindo neste um modelo de edifício que retrata da forma o mais aproximada possível a situação monitorizada experimentalmente. Para tal, além do modelo em si do edifício, ser o mais próximo possível da realidade, existiu o cuidado de inserir nos ficheiros climáticos horários da Maia, desenvolvidos para leitura no CAPSOL (e cuja base foi a série horária meteorológica de referência para a Maia (TRY), inserida no programa informático SOLTERM), os dados climáticos que foram obtidos no período de medição experimental através da estação meteorológica instalada na cobertura do edifício alvo de monitorização (ver Capítulo V). A explicação da produção destes ficheiros está integrada no Capítulo VII.

Foram executadas três comparações a este nível, correspondentes a três situações distintas monitorizadas *in situ*:

- 1ª) Antes da colocação de ITRBE, ou seja, como único isolamento térmico existente, a manta de lã de rocha de 4 cm de espessura, revestida com papel e aplicada por cima da esteira;
- 2ª) Com a colocação de ITRBE, na esteira, por cima da lã de rocha;
- 3ª) Com a colocação de ITRBE tanto na esteira, por cima da lã de rocha, como por baixo das telhas, nas vertentes da cobertura.

A temperatura utilizada no CAPSOL para os restantes espaços interiores foi, neste desiderato, uma temperatura constante igual à média da temperatura do ar exterior no período considerado.

8.1.1 COMPARAÇÃO PARA A SITUAÇÃO SEM ITRBE

Esta comparação foi realizada para o período compreendido entre 26/8 às 21h10min e 29/8 às 10h, período esse, efetivamente, utilizado nas respetivas medições *in situ*.

Apresentam-se nas Figuras 8.1 e 8.2 os gráficos das temperaturas obtidas respetivamente no quarto e no desvão de cobertura, tanto pelos valores medidos como pelos calculados.

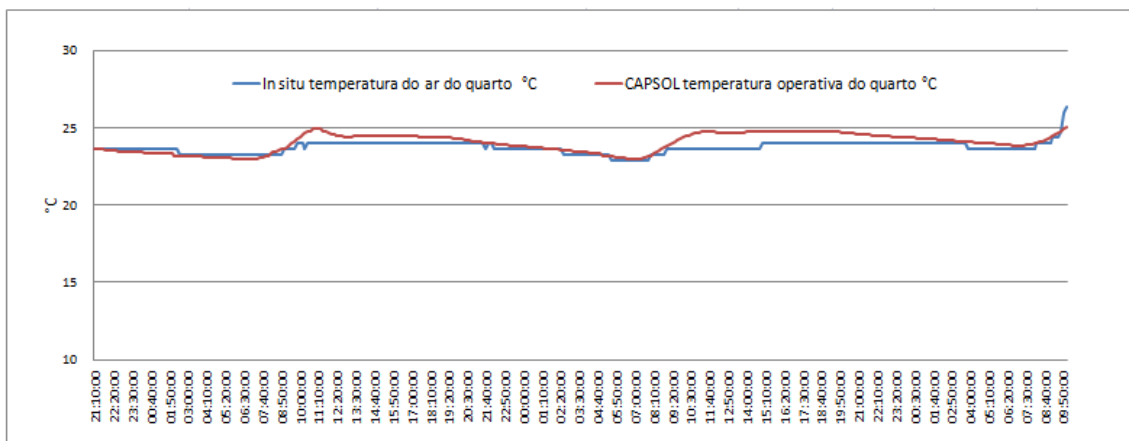


Figura 8.1
COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO QUARTO, NA SITUAÇÃO SEM ITRBE, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

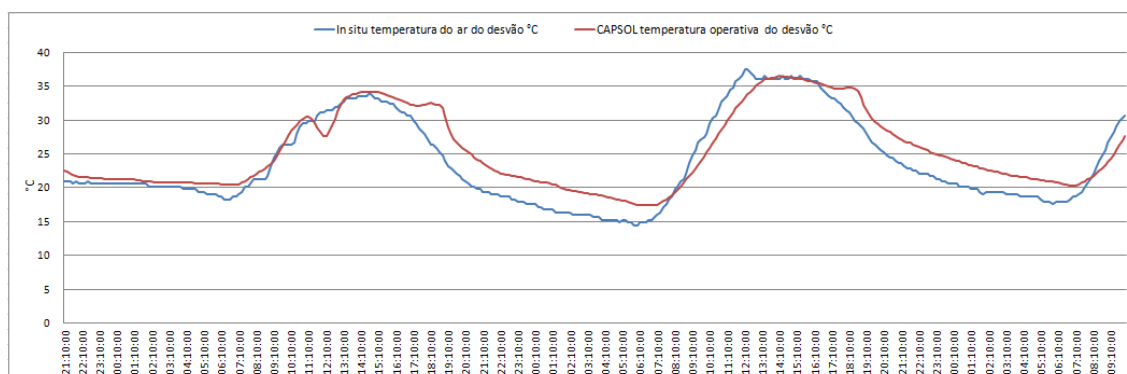


Figura 8.2
COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO DESVÃO, NA SITUAÇÃO SEM ITRBE, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

Pela análise dos gráficos anteriores, infere-se da grande proximidade entre as medições *in situ* e do CAPSOL, apesar de a temperatura obtida *in situ* ser a do ar e não a operativa (que entra com a influência da radiação das superfícies dos compartimentos em causa) como é no caso do CAPSOL. Uma vez que as vertentes recebem muita radiação e estão muito quentes, tal poderá ajudar a explicar as diferenças e sobretudo o desfasamento das temperaturas visíveis na Figura 8.2.

Apresentam-se nas Figuras 8.3 e 8.4, respetivamente, as temperaturas superficiais tanto na face inferior (teto do quarto) como superior da laje de esteira, tanto pelos valores medidos como pelos calculados.

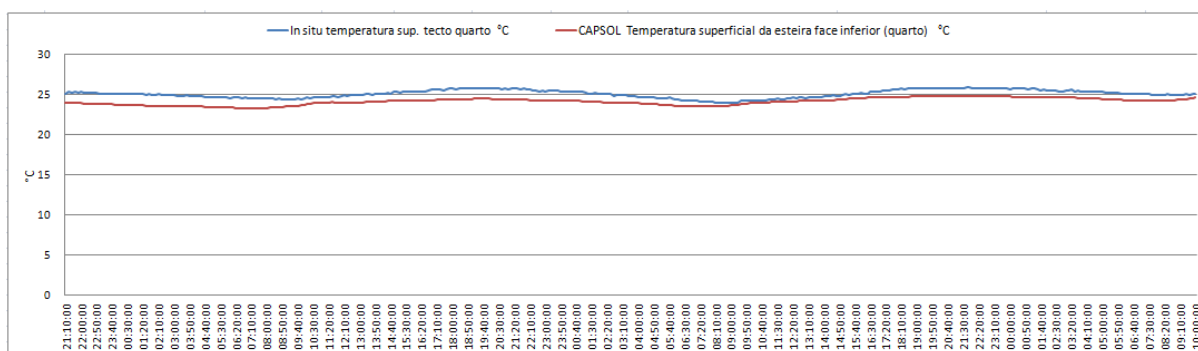


Figura 8.3

COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO TETO DO QUARTO, NA SITUAÇÃO SEM ITRBE, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

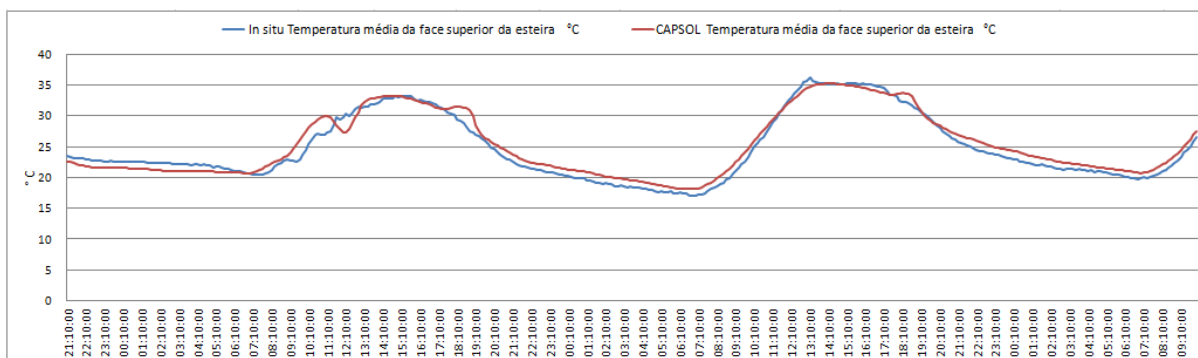


Figura 8.4

COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DA FACE SUPERIOR DA ESTEIRA, NA SITUAÇÃO SEM ITRBE, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

Na Figura 8.5 apresentam-se os fluxos de calor (em W/m^2) através da esteira, resultantes tanto das medições *in situ* como dos cálculos com recurso ao CAPSOL.

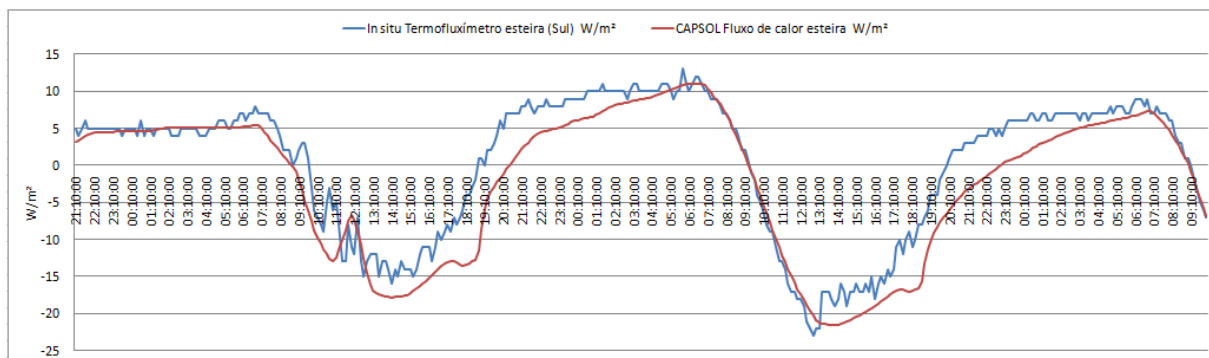


Figura 8.5
COMPARAÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR ATRAVÉS DA ESTEIRA, NA SITUAÇÃO SEM ITRBE, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

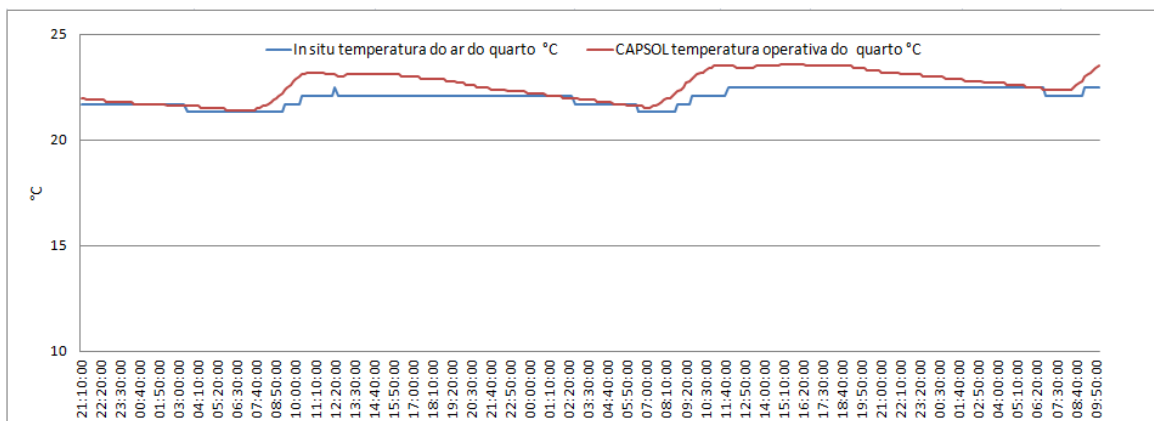
Pela análise dos gráficos das Figuras 8.3 a 8.5, pode-se concluir, igualmente, da grande proximidade entre os resultados das medições *in situ* e os obtidos com recurso ao CAPSOL.

Pelo atrás exposto, concluiu-se que é válido usar o CAPSOL, seguindo a metodologia de introdução de dados e procedimentos usados pelo autor, de forma a simular o tipo de edifícios em causa e isolados termicamente com materiais resistivos na esteira.

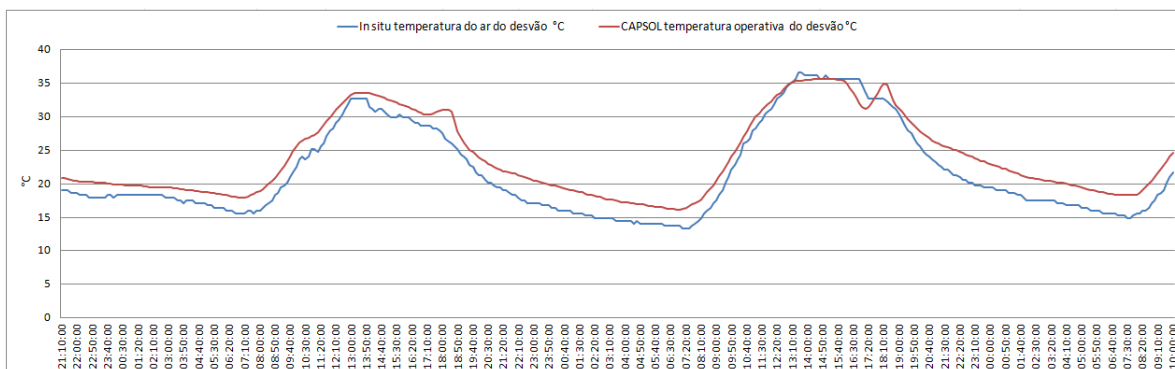
8.1.2 COMPARAÇÃO PARA A SITUAÇÃO DE APLICAÇÃO DE ITRBE POR CIMA DA LAJE DE ESTEIRA

Esta comparação foi realizada para o período compreendido entre 8/9 às 21h10min e 11/9 às 10h, período esse efetivamente utilizado nas respetivas medições *in situ*.

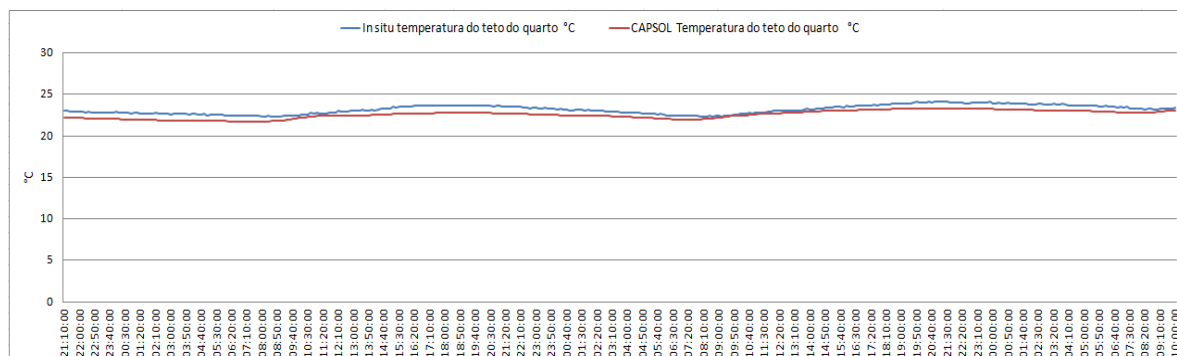
Apresentam-se nas Figuras 8.6 e 8.7 os respetivos gráficos, tanto para os valores medidos como para os calculados, das temperaturas obtidas respetivamente no quarto e no desvão e nas Figuras 8.8 e 8.9 as temperaturas superficiais respetivamente na face inferior (teto do quarto) e superior da esteira.

**Figura 8.6**

COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO QUARTO, NA SITUAÇÃO COM ITRBE NA ESTEIRA, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

**Figura 8.7**

COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO DESVÃO, NA SITUAÇÃO COM ITRBE NA ESTEIRA, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

**Figura 8.8**

COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO TETO DO QUARTO, NA SITUAÇÃO COM ITRBE NA ESTEIRA, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

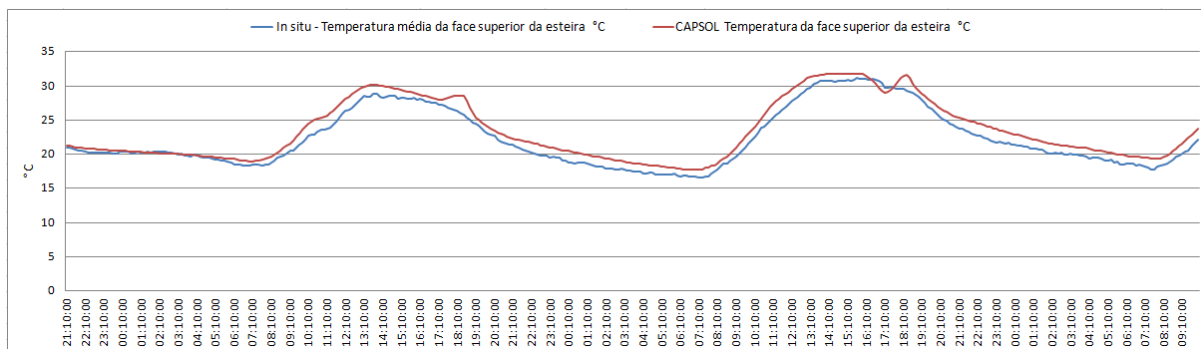


Figura 8.9

COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DA FACE SUPERIOR DA ESTEIRA, NA SITUAÇÃO COM ITRBE APLICADO NESTA, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

Da análise dos gráficos 8.6 a 8.9 pode-se inferir da grande proximidade entre os resultados *in situ* e os obtidos pelo uso do CAPSOL.

Na Figura 8.10 apresentam-se os fluxos de calor (em W/m^2) através da esteira, resultantes tanto das medições *in situ* como do uso do CAPSOL.

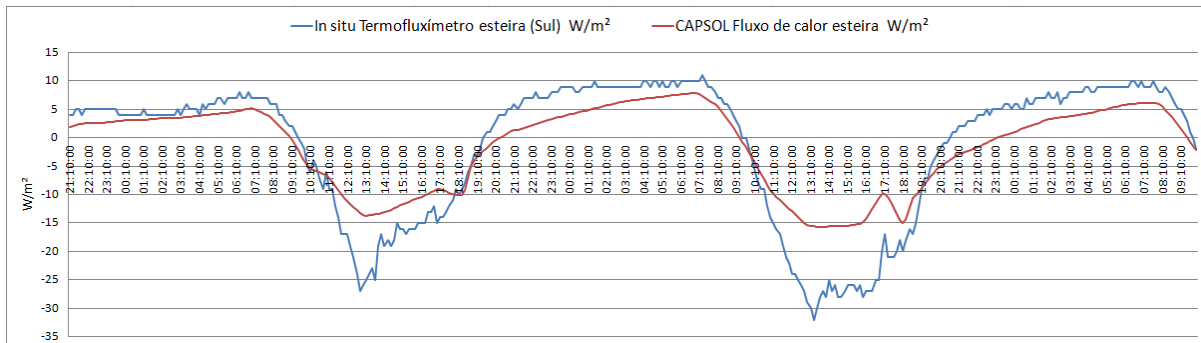


Figura 8.10

COMPARAÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR ATRAVÉS DA ESTEIRA, NA SITUAÇÃO COM ITRBE APLICADO NESTA, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

Pela análise dos gráficos da Figura anterior, pode-se concluir, que neste caso já existe um maior afastamento entre os resultados medidos e calculados, relativo ao fluxo de calor que atravessa a esteira. É que, quando o autor mediu *in situ* o fluxo de calor na esteira com ITRBE, cometeu o lapso de não ter revestido os termofluxímetros com uma folha de alumínio polido igual ao integrante do ITRBE usado (Figura 8.11).



Figura 8.11
MEDIÇÃO DO FLUXO DE CALOR COM TERMOFLUXÍMETRO SEM ESTAR REVESTIDO COM ALUMÍNIO POLIDO

Assim, como a emissividade da superfície preta do termofluxímetro é substancialmente maior do que a do alumínio polido do ITRBE, os fluxos de calor medidos resultaram razoavelmente maiores do que os valores calculados.

Quanto à situação de se verificar uma maior diferença entre as medições *in situ* e do CAPSOL, para o fluxo ascendente, do que em relação ao fluxo descendente, tal deverá, em princípio, ter a ver com o facto de que aquele se dá com mais facilidade do que o fluxo descendente, e por isso mesmo, o facto de haver um ITRBE, o mesmo se faça sentir com mais eficácia quando existe um sentido ascendente do fluxo de calor.

No entanto, em medições *in situ* posteriores, e que se apresentam em 8.1.3, quando se mediu, igualmente, o fluxo de calor através da esteira, nomeadamente na situação de ITRBE além de aplicado na esteira, também aplicado por baixo das vertentes, já o autor teve o cuidado de revestir os termofluxímetros com uma folha de alumínio polida igual à usada no ITRBE aplicado, sendo que neste caso os resultados dos fluxos de calor *in situ* e no CAPSOL voltaram a ter uma grande proximidade, como se demonstrará a seguir, em 8.1.3.

Assim, optou-se, por deixar neste trabalho esta referência ao gráfico da Figura 8.10, de forma a alertar para a importância de que, em qualquer medição de fluxos de calor que atravessam um elemento construtivo revestido com ITRBE, se deverá revestir o termofluxímetro com folha de baixa emissividade constituinte do referido isolamento aplicado (Figura 8.12).

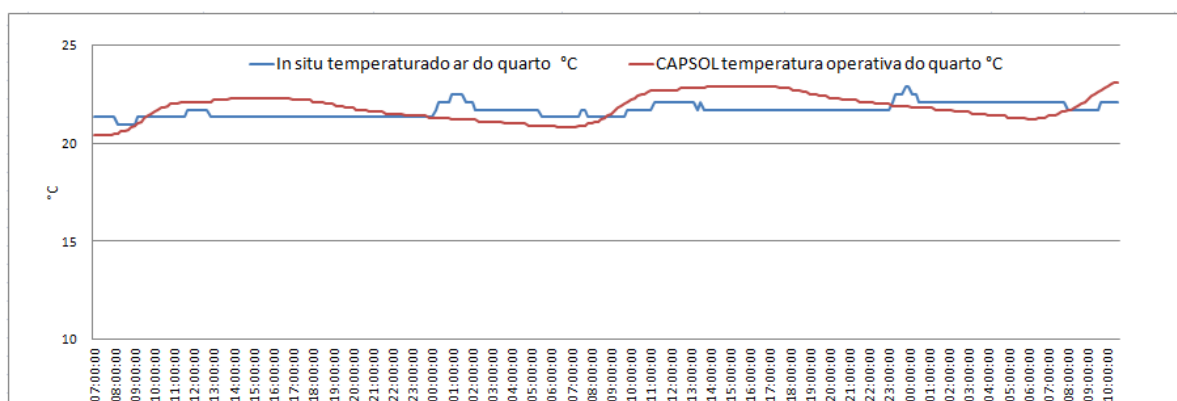
**Figura 8.12**

MEDIÇÃO DO FLUXO DE CALOR COM TERMOFLUXÍMETRO REVESTIDO COM ALUMÍNIO POLIDO

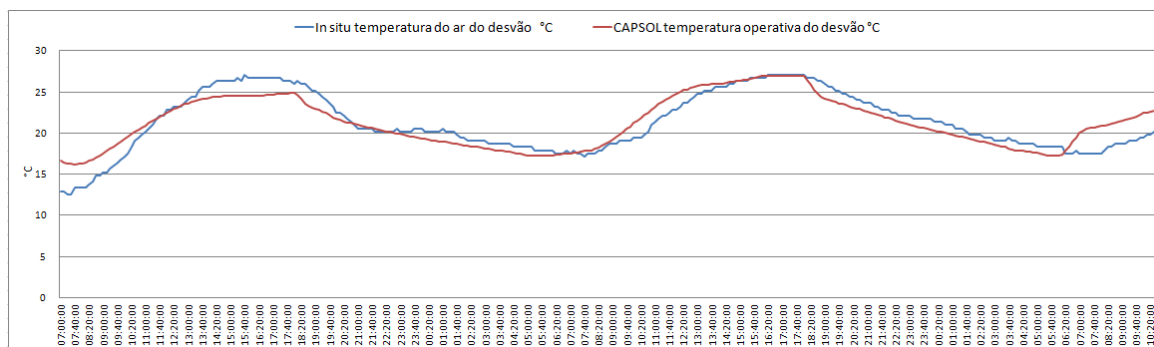
Pelo atrás exposto, tendo em conta os resultados bem próximos das temperaturas, e estando explicado o desvio de resultados relativamente aos fluxos de calor, concluiu-se que é válido usar o CAPSOL, seguindo a metodologia de introdução de dados e processos desenvolvidos pelo autor, de forma a simular o tipo de edifícios em causa isolados termicamente com materiais ITRBE na esteira.

8.1.3 COMPARAÇÃO PARA A SITUAÇÃO DE APLICAÇÃO DE ITRBE TANTO POR CIMA DA LAJE DE ESTEIRA COMO POR BAIXO DAS VERTENTES

Esta comparação foi realizada para o período compreendido entre 19/9 às 7h e 21/9 às 10h30min., período esse efetivamente utilizado nas respetivas medições *in situ*. Apresentam-se respetivamente nas Figuras 8.13 e 8.14 os gráficos das temperaturas obtidas no quarto e no desvão de cobertura, tanto pelos valores medidos como pelos calculados.

**Figura 8.13**

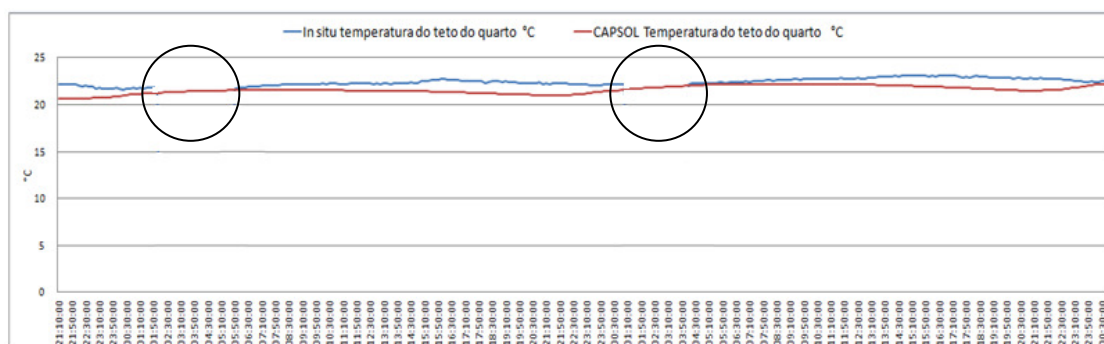
COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO QUARTO, NA SITUAÇÃO COM ITRBE NA ESTEIRA E NAS VERTENTES, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

**Figura 8.14**

COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO DESVÃO, NA SITUAÇÃO COM ITRBE NA ESTEIRA E NAS VERTENTES, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

Pela análise dos gráficos anteriores, infere-se da grande proximidade entre as medições *in situ* e do CAPSOL, apesar de a temperatura obtida *in situ* ser a do ar e não a operativa, como é no caso do CAPSOL. É interessante notar que neste caso as superfícies estão a uma temperatura mais próxima da do ar e, portanto, a diferença entre a temperatura operativa e a temperatura do ar é menor.

Apresentam-se nas Figuras 8.15 e 8.16 as temperaturas superficiais tanto na face inferior (teto do quarto) como superior da esteira, obtidas tanto pelos valores medidos como pelos calculados. Realça-se que neste período existiram dois subperíodos de quebra (assinalados nas Figuras) no registo das medições *in situ* por parte do “datalogger” no respeitante à informação vinda dos termopares, termofluxímetros, e restantes sensores, como se pode depreender pela análise das Figuras seguintes. Realça-se que os dados utilizados nos ficheiros climáticos de leitura do CAPSOL, foram determinados, tendo em conta os dados do SOLTERM e os dados recolhidos experimentalmente antes e depois das quebras.

**Figura 8.15**

COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO TETO DO QUARTO, NA SITUAÇÃO COM ITRBE NA ESTEIRA E NAS VERTENTES, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

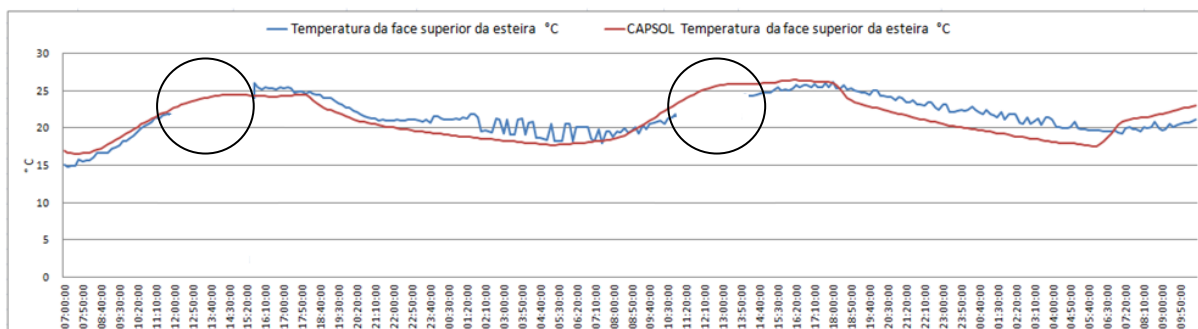


Figura 8.16
COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DA FACE SUPERIOR DA ESTEIRA, NA SITUAÇÃO COM ITRBE APLICADO NESTA E NAS VERTENTES, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

Da análise dos dois gráficos anteriores, mesmo com a existência dos períodos de quebra referidos, pode-se inferir da grande proximidade entre os resultados *in situ* e os obtidos pelo uso do CAPSOL.

Na Figura 8.17 apresentam-se os fluxos de calor (em W/m^2) através da esteira, resultantes tanto das medições *in situ* como do uso do CAPSOL.

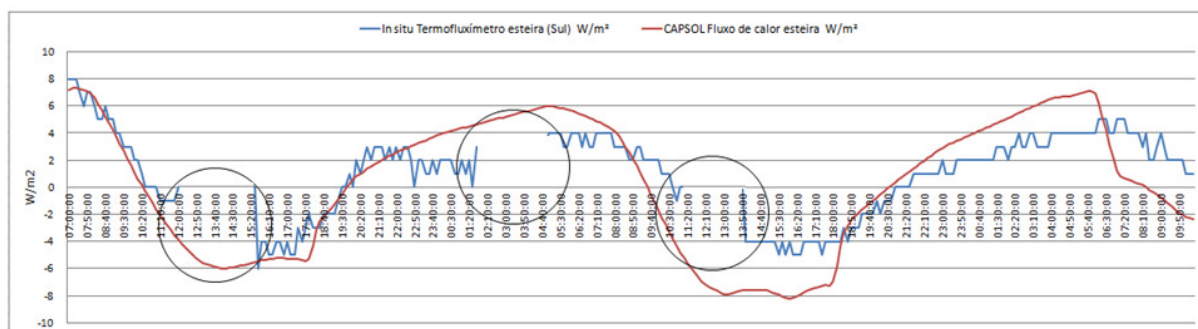


Figura 8.17
COMPARAÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR ATRAVÉS DA ESTEIRA, NA SITUAÇÃO COM ITRBE APLICADO NESTA E NAS VERTENTES, *IN SITU* VERSUS CAPSOL

Pela análise dos gráficos da Figura anterior, pode-se concluir, igualmente, da grande proximidade entre os resultados do fluxo de calor através da esteira, obtidos pelos dois processos, apesar de, como já foi referido, existirem subperíodos de quebra de resultados, que implicam na imagem acima (ver zonas assinaladas), uma aparente distanciação entre os resultados *in situ* e do CAPSOL, que no entanto são sempre valores muito baixos pois neste caso o valor máximo absoluto do fluxo de calor é de cerca de 8 W/m^2 .

Pelo exposto em 8.1.3, tendo em conta os resultados bem próximos das temperaturas e fluxos de calor, concluiu-se que é válido usar o CAPSOL, seguindo a metodologia de introdução de dados e processos desenvolvidos pelo autor, de forma a simular o tipo de edifício em causa isolado termicamente com materiais ITRBE tanto na esteira como na cobertura.

Comparando os resultados de 8.1, 8.2 e 8.3, pode-se concluir que de 8.1 para 8.3, as temperaturas e os fluxos de calor são sucessivamente mais baixos.

Conclui-se, assim, este ponto 8.1 sobre as comparações dos resultados *in situ* como os do CAPSOL, referindo que está, assim, validado o procedimento seguido com o uso do CAPSOL para desenvolver simulações envolvendo outros cenários. Também e por sua vez se valida os resultados experimentais apresentados no Capítulo VI.

8.2 ESTUDO DE VÁRIOS CENÁRIOS NO EDIFÍCIO ISOLADO PELO INTERIOR, COM COBERTURA DE DUAS ÁGUAS E ESTEIRA

Nestes cenários a zona do edifício em causa, que possui as mesmas soluções construtivas do edifício alvo de monitorização experimental (ver Capítulo V), nomeadamente mantém o isolamento térmico das paredes que tinha na realidade, ou seja todas as paredes interiores e exteriores apresentam isolamento térmico pelo interior (ITICS), que como é sabido praticamente anulam a contribuição para a inércia térmica dessas mesmas paredes. Este cenário é relevante para em seguida verificar o que as várias soluções de isolamento térmico da esteira pesada da cobertura, podem afetar no comportamento térmico do quarto devido ao comprometimento ou não da inércia térmica da referida esteira.

A seguir, e para cada localidade escolhida, como representativa das zonas climáticas de verão (V1, V2 e V3) em Portugal, bem como de outros locais do espaço da Comunidade dos Países de Língua Portuguesa (CPLP), nomeadamente Petrolina no Brasil e Dili em Timor Leste, apresentam-se os resultados da aplicação do CAPSOL para vários cenários simulados, tendo como modelo de base o apresentado anteriormente, que permitam discorrer sobre a influência do uso dos ITRBE no desempenho térmico dos edifícios, bem como sobre os cuidados de aplicação a respeitar para estes isolamentos, de forma a maximizar os seus benefícios.

Todas estas simulações de cenários foram realizadas para os vários locais já especificados e, tendo em conta a análise dos respetivos ficheiros climáticos, para os 3 dias do ano em que se atingiram as maiores temperaturas do ar exterior bem como os 3 dias do ano em que se atingiram as menores temperaturas. Em todas as simulações numéricas considerou-se sempre o seu início 10 dias antes do período pretendido, de forma a permitir que o efeito da inércia térmica fique estabilizado. Quanto aos ficheiros climáticos, as suas características, o modo de os obter e as adaptações necessárias para a sua leitura no CAPSOL, os mesmos constam do Capítulo VII.

No Quadro 8.1 apresentam-se os locais considerados na simulação numérica dos vários cenários, apresentando-se os respetivos períodos de temperatura máxima considerados e a justificação dos mesmos, tendo em conta as temperaturas atingidas do ar exterior. De salientar, tal e qual já foi abordado no Capítulo VII, de que a opção pela utilização de Petrolina (Brasil) deveu-se a ser o local da CPLP que, nos ficheiros climáticos a que o autor teve acesso, se atinge a temperatura exterior do ar mais elevada e a opção de Dili (Timor Leste) deveu-se a ser o local com a maior temperatura exterior média anual. Acresce a este facto que os dois locais em causa têm ao longo do ano, e ao longo de cada dia, amplitudes térmicas substancialmente menores do que em Portugal, nomeadamente do que em Beja que apresenta uma temperatura máxima do ar da mesma ordem de grandeza do que Petrolina e Dili.

Quadro 8.1
LOCAIS, PERÍODOS DE SIMULAÇÃO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR E TEMPERATURAS DO AR ATINGIDAS

Local	Temperatura máxima atingida no ano	Período de simulação e respetiva temperatura média
Montalegre (Portugal)	31,4°C em 25/7 às 15h	24/7 (0h) a 27/7(0h) e 21,8°C
Maia(Portugal)	30,1°C em 2/8 às 15h	1/8 (0h) a 4/8 (0h) e 19,8°C
Beja(Portugal)	40,2°C em 1/8 às 15h	31/7 (0h) a 3/8 (0h) e 26,9°C
Petrolina (Brasil)	41,5°C em 29/9 às 14h	28/9 (0h) a 1/10 (0h) e 28,1°C
Dili (Timor Leste)	38,8 em 4/6 às 13h	3/6 (0h) a 6/6 (0h) e 31,3°C

Tendo em conta, para cada local considerado, as temperaturas médias do ar exterior relativas ao período de simulação utilizado, considerou-se que o restante espaço interior do edifício em contacto com o quarto, apresenta uma temperatura constante e próxima da média da temperatura do ar exterior, sendo que se limitou ao máximo de 25°C, tendo em conta a

contribuição do solo (grande parte do edifício tem um só piso que está em contacto com o solo). Assim, apresenta-se no Quadro 8.2, para o período de simulação (e para os dez dias anteriores), o valor das temperaturas dos restantes compartimentos interiores, a maioria em contacto com o solo.

Quadro 8.2
TEMPERATURAS PARA OS RESTANTES ESPAÇOS EM CONTACTO COM O QUARTO, EM PERÍODO DE MÁXIMAS TEMPERATURAS DO AR EXTERIOR

Local	Máximas temperaturas
Montalegre (Portugal)	20°C
Maia (Portugal)	20°C
Beja (Portugal)	25°C
Petrolina (Brasil)	25°C
Dili (Timor Leste)	25°C

De forma a verificar-se qual o comportamento dos ITRBEs a baixas temperaturas, realizaram-se unicamente simulações de cenários para a localidade de Montalegre, pelo facto de ser aquela, das cinco, que atinge anualmente as temperaturas do ar exterior mais baixas.

No Quadro 8.3 apresenta-se o respetivo período de temperatura mínima do ar exterior considerado em Montalegre e a justificação do mesmo, tendo em conta as temperaturas atingidas do ar exterior.

Quadro 8.3
LOCAIS, PERÍODOS DE SIMULAÇÃO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR E TEMPERATURAS DO AR ATINGIDAS

Local	Temperatura máxima atingida no ano	Período de simulação no verão e respetiva temperatura média	Temperatura mínima atingida no ano	Período de simulação no inverno e respetiva temperatura média
Montalegre (Portugal)	31,4°C em 25/7 às 15h	24/7 (0h) a 27/7 (0h) e 21,8°C	-0,8°C em 18/1 às 7h	17/1 (0h) a 20/1 (0h) e 4,3°C

Por razões semelhantes às apresentadas para os períodos de máxima temperatura exterior, considerou-se que os restantes compartimentos em contacto com o quarto apresentam neste período (e nos dez dias anteriores) uma temperatura constante de 10°C.

Como a radiação solar é um dos parâmetros climáticos relevantes no âmbito deste estudo, apresentam-se nas Figuras 8.18 a 8.22 as variações da intensidade de radiação solar global (qs

hor-glb) e difusa (qs hor-dif) na horizontal para os cinco locais e períodos de máxima temperatura exterior considerados.

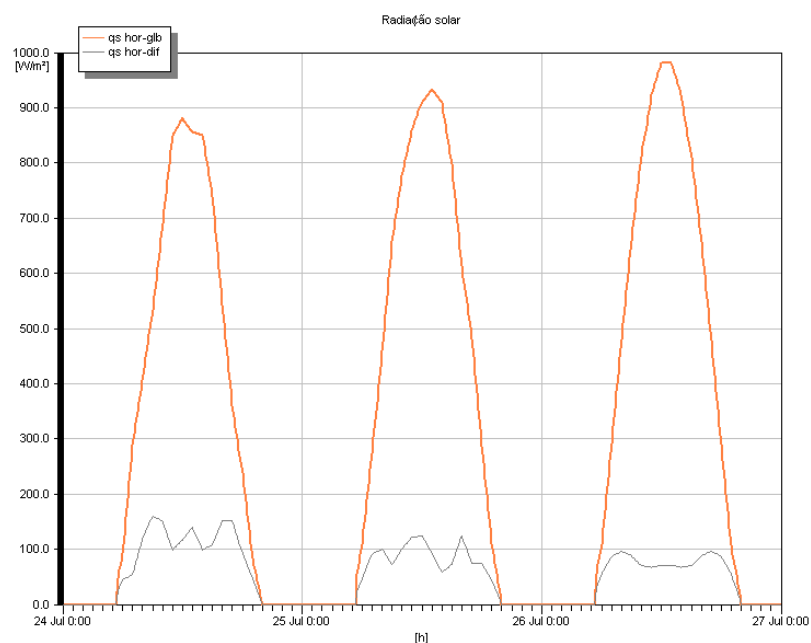


Figura 8.18
INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR EM MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

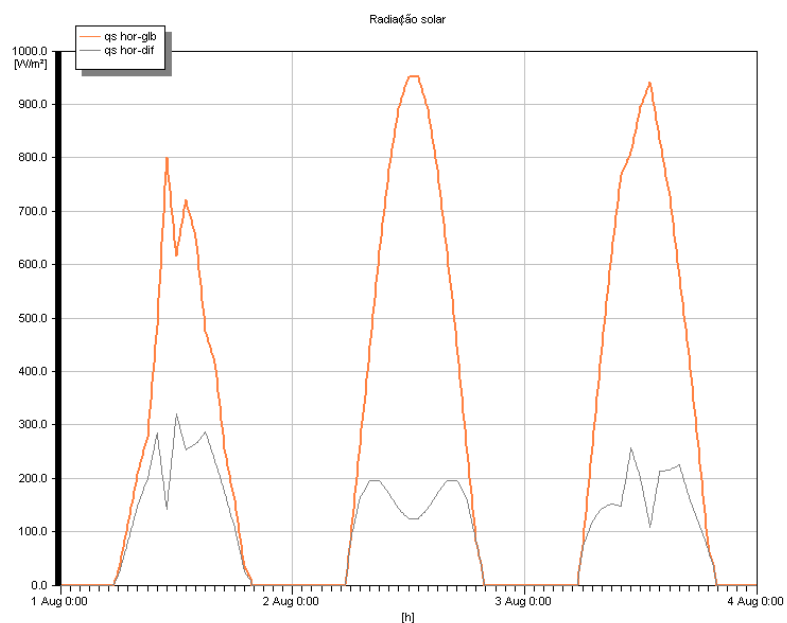


FIGURA 8.19
INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR NA MAIA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

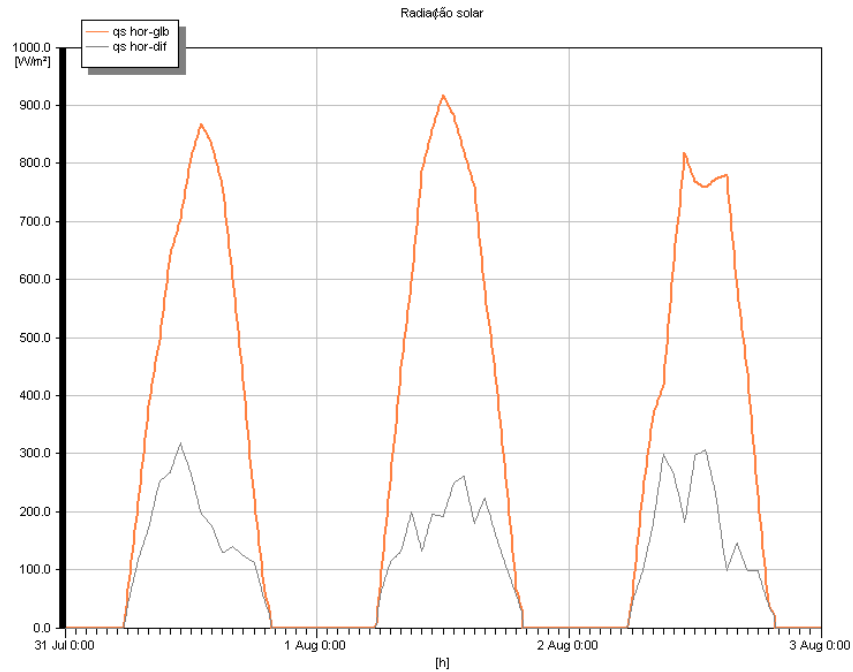


Figura 8.20
INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR EM BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

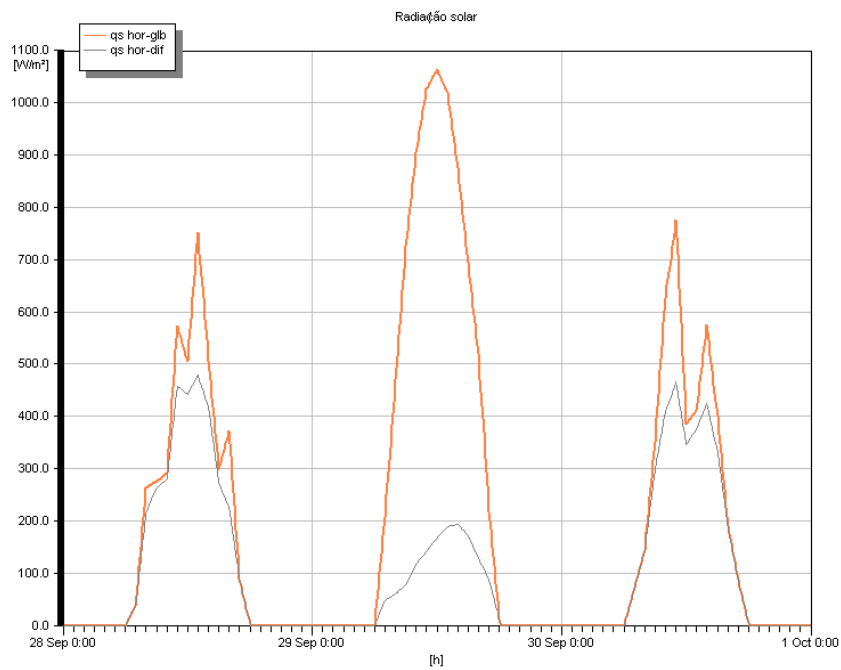


Figura 8.21
INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR EM PETROLINA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

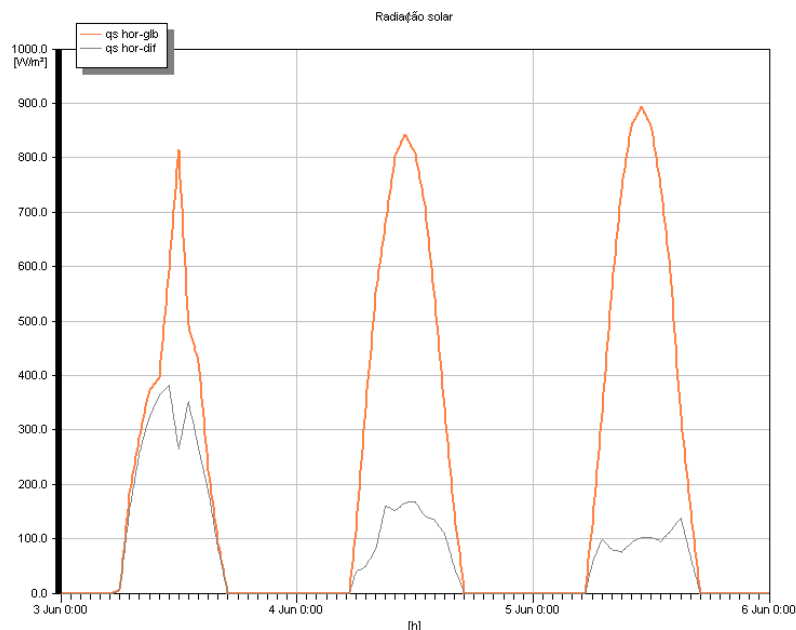


Figura 8.22
INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR EM DILI NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Pela análise dos gráficos da intensidade de radiação solar dos cinco locais em estudo pode-se inferir que os respetivos valores são muito semelhantes. Evidencia-se a localidade Brasileira de Petrolina que ultrapassa o valor de 1000 W/m^2 , não sendo tal alheio ao facto de ser nesta localidade onde se atinge uma temperatura máxima superior. De qualquer modo, realça-se, por exemplo, que a grande diferença de temperaturas do ar exterior, e consequentes temperaturas interiores no edifício, existentes entre Dili e Montalegre não se poderá justificar unicamente pela intensidade da radiação solar, pois os valores da radiação global na horizontal são muito semelhantes, embora os valores da radiação difusa sejam algo superiores em Dili.

8.2.1 EDIFÍCIO COM ESTEIRA PESADA E SEM QUALQUER TIPO DE ISOLAMENTO TÉRMICO NA COBERTURA

8.2.1.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

Este cenário integra a laje de esteira aligeirada (de vigotas pré-esforçadas com blocos cerâmicos de cofragem) com 16,5 cm de espessura, revestida inferiormente com 1,5 cm de estuque, sem qualquer tipo de isolamento térmico, e duas vertentes (duas águas) constituídas

por telha cerâmica marselha apoiada em estrutura de madeira, constituindo-se, assim, um desvão de cobertura que se considerou sujeito a uma ventilação de 3 RPH. Considerou-se o quarto desocupado, fechado, com uma renovação de ar de 0,2 RPH, sem ganhos internos, e com as janelas com as portadas interiores de alumínio lacado a branco fechadas a obturar a entrada da radiação solar direta.

De seguida, nas Figuras 8.23 a 8.27 apresentam-se, os gráficos de temperaturas atingidas para este cenário nos cinco locais e nos períodos de máxima temperatura exterior.

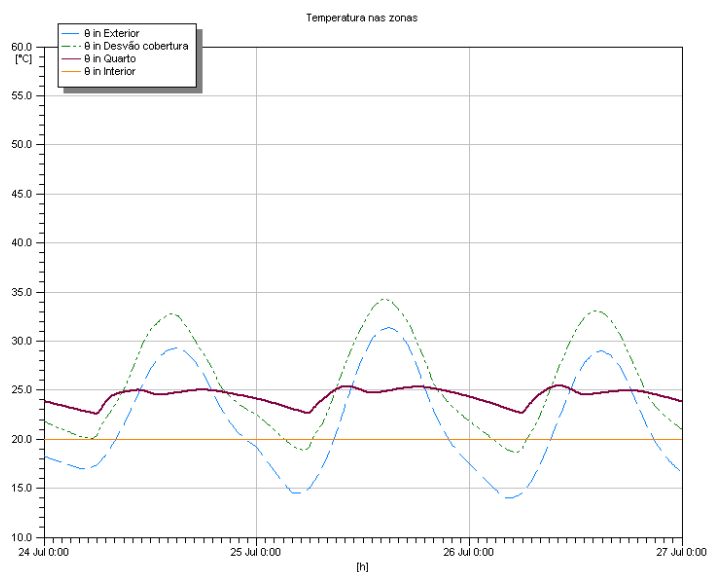


Figura 8.23

TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.1 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

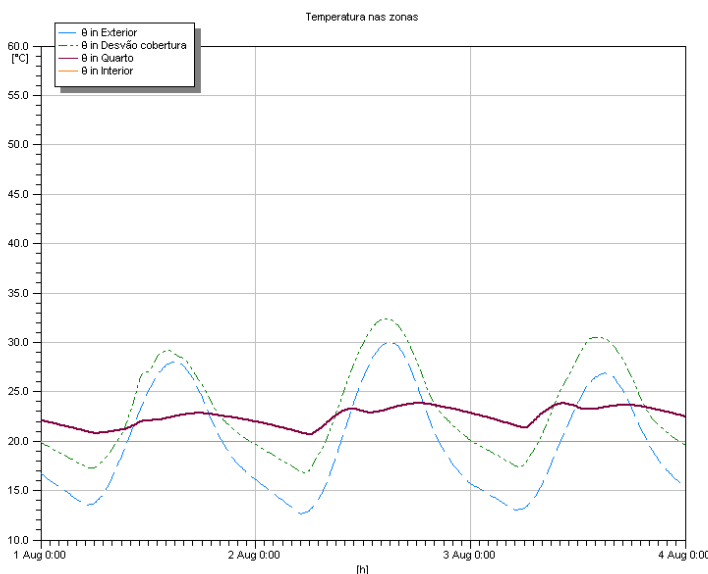


Figura 8.24

TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.1 E PARA A MAIA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

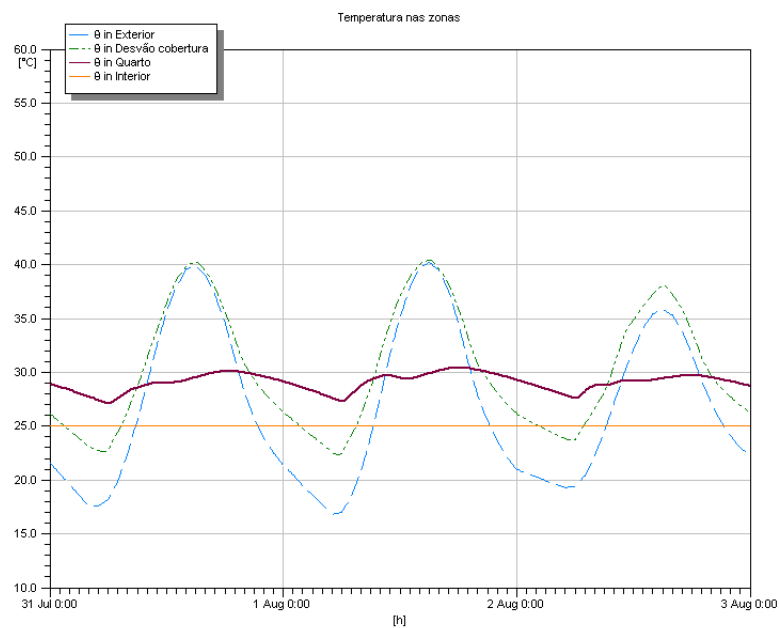


Figura 8.25
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.1 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

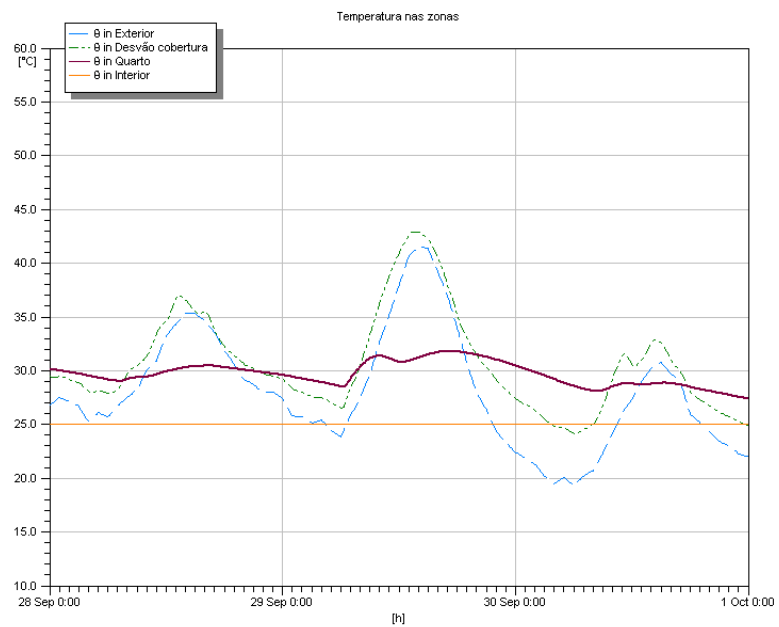


Figura 8.26
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.1 E PARA PETROLINA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

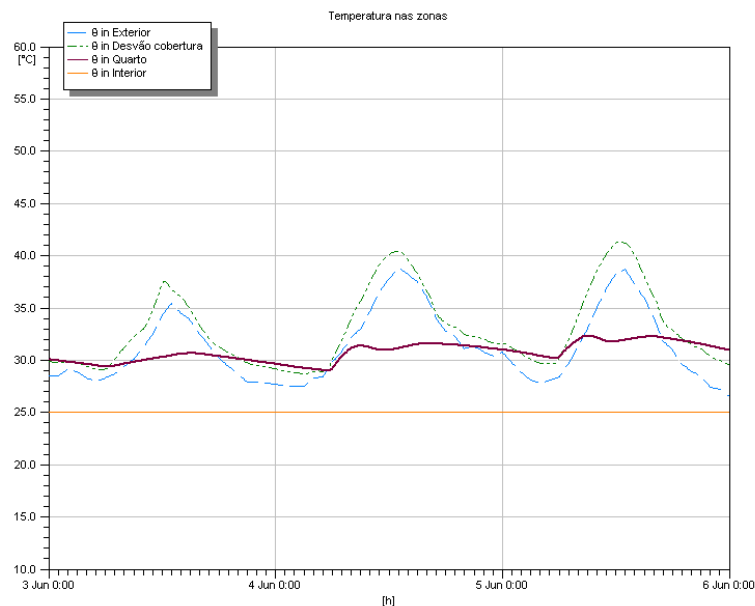


Figura 8.27
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.1 E PARA DILI NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

No Quadro 8.4 apresentam-se os valores das temperaturas médias, máximas e mínimas obtidas nas cinco localidades e nos períodos de máxima temperatura exterior.

Quadro 8.4
TEMPERATURAS OPERATIVAS E DO AR NO CENÁRIO 8.2.1 NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Temperaturas operativas dos compartimentos e temperatura do ar exterior				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Exterior	21,8	31,4	14
	Desvão de cobertura	25,6	34,2	18,6
	Quarto	24,4	25,4	22,6
Maia	Exterior	19,8	30,1	12,6
	Desvão de cobertura	23,2	32,4	16,8
	Quarto	22,5	23,8	20,7
Beja	Exterior	26,9	40,2	16,8
	Desvão de cobertura	30,2	40,4	22,3
	Quarto	29,1	30,4	27,1
Petrolina	Exterior	28,1	41,5	19,3
	Desvão de cobertura	30,7	42,9	24,1
	Quarto	29,7	31,8	27,4
Dili	Exterior	31,3	38,8	26,5
	Desvão de cobertura	33,0	41,3	28,7
	Quarto	30,7	32,3	29,0

No Quadro 8.5 apresentam-se os valores das temperaturas médias, máximas e mínimas das superfícies da cobertura e da esteira, obtidas nas cinco localidades e nos períodos considerados.

Quadro 8.5
TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA NO CENÁRIO 8.2.1 NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Temperaturas superficiais				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	26,9	44,9	15,1
	Face interior da cobertura oeste	26,8	44,0	15,4
	Face superior da esteira	25,3	28,9	22,0
	Face inferior da esteira	24,8	26,5	23,2
Maia	Face exterior da cobertura oeste	24,2	43,1	13,6
	Face interior da cobertura oeste	24,1	42,1	13,9
	Face superior da esteira	23,0	27,0	19,7
	Face inferior da esteira	22,7	24,8	20,8
Beja	Face exterior da cobertura oeste	31,6	52,0	18,1
	Face interior da cobertura oeste	31,4	50,9	18,5
	Face superior da esteira	30,0	34,2	26,2
	Face inferior da esteira	29,5	31,6	27,6
Petrolina	Face exterior da cobertura oeste	31,4	55,3	20,5
	Face interior da cobertura oeste	31,3	54,1	20,8
	Face superior da esteira	30,7	36,3	27,2
	Face inferior da esteira	30,3	33,2	27,9
Dili	Face exterior da cobertura oeste	34,5	50,9	27,2
	Face interior da cobertura oeste	34,4	50,0	27,5
	Face superior da esteira	32,3	36,1	29,6
	Face inferior da esteira	31,4	33,5	29,5

Pela análise dos Quadros 8.4 e 8.5 verifica-se que apesar da Maia pertencer à região climática V2 e Montalegre à região climática V1, nos períodos considerados, as temperaturas atingidas na primeira localidade são inferiores às da segunda. Também é relevante referir que embora em Dili se atinjam temperaturas máximas da mesma ordem de grandeza do que em Beja, verifica-se que em termos de amplitudes térmicas a primeira apresenta valores razoavelmente menores do que a segunda. Efetivamente a amplitude térmica do ar exterior é menor em Dili comparativamente a Beja e mesmo a Petrolina. Tal situação provoca que mesmo em termos de temperaturas máximas no quarto, o maior valor seja atingido em Dili, apesar da

temperatura máxima do ar exterior ocorrer em Petrolina, com uma diferença de 2,7°C, não sendo alheio deste facto a ação da inércia térmica dos elementos construtivos.

No Quadro 8.6 apresentam-se os valores médios e máximos dos fluxos de calor, através da área total da esteira, por radiação, convecção e condução, obtidos nas cinco localidades e períodos considerados.

Quadro 8.6
FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO NO CENÁRIO 8.2.1 NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Fluxos de calor: Esteira -> Quarto				
Local	Fluxo	Fluxo médio W	Fluxo descendente máximo W	Fluxo ascendente máximo W
Montalegre	Radiação	40,6	140,2	-153,0
	Convecção	25,1	76,7	-71,0
	Condução	63,6	214,3	-229,5
Maia	Radiação	21,0	117,0	-156,6
	Convecção	13,9	64,2	-76,3
	Condução	33,2	178,6	-235,8
Beja	Radiação	42,2	143,6	-141,5
	Convecção	25,5	79,1	-67,7
	Condução	65,8	219,8	-213,2
Petrolina	Radiação	57,8	164,7	-136,5
	Convecção	33,8	90,0	-64,6
	Condução	89,7	251,9	-204,6
Dili	Radiação	67,7	147,5	-94,8
	Convecção	38,0	80,3	-44,7
	Condução	104,7	226,0	-141,4

Na análise do Quadro anterior interessa ter em conta que o sinal positivo do fluxo indica que este ocorre no sentido descendente, da esteira para o quarto, e o sinal negativo que ocorre no sentido contrário. É igualmente relevante referir, que em termos de fluxos de calor médios, estes foram calculados através de uma média aritmética simples integrando todos os valores positivos e negativos que ocorreram no período considerado. Verifica-se, pelos resultados, que em termos de fluxos médios e máximos (tanto descendentes como ascendentes) que o mais relevante foi o por condução, seguindo-se o de radiação. É relevante referir que o fluxo de calor médio em Dili é superior ao de todos os outros locais, sendo que é em Petrolina que se atingem os maiores valores máximos absolutos.

8.2.1.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

De seguida e para Montalegre, apresenta-se um estudo similar para o mesmo edifício e com as mesmas características referidas anteriormente, mas agora para o período de menores temperaturas do ar exterior que ocorreram nessa localidade, que é aquela das cinco, que atinge temperaturas mais baixas. No gráfico da Figura 8.28 apresentam-se as variações da intensidade de radiação solar global (qs hor-glb) e difusa (qs hor-dif) na horizontal e nesse período.

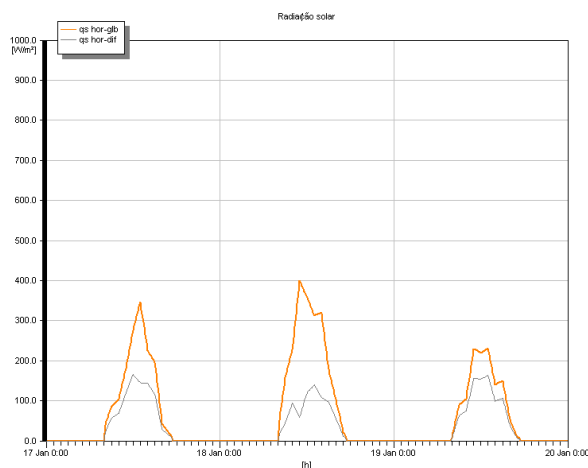


Figura 8.28
INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR EM MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Na Figuras 8.29 apresenta-se, o gráfico de temperaturas atingidas para este mesmo cenário.

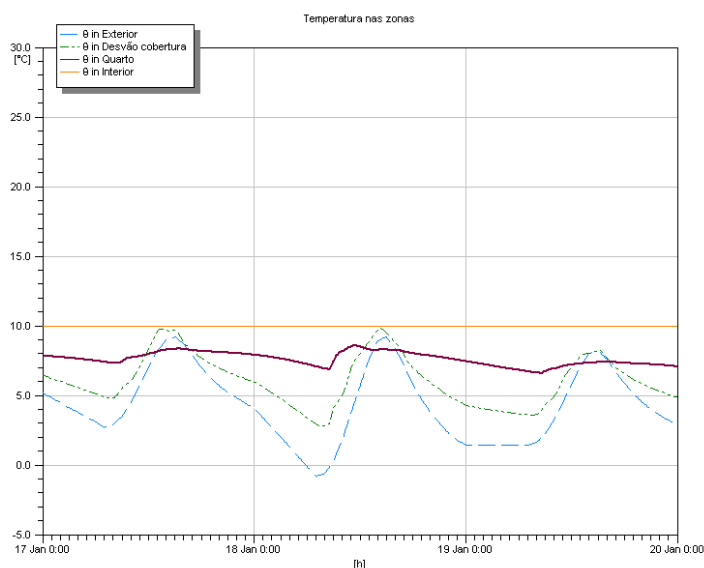


Figura 8.29
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.1 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

No Quadro 8.7 apresentam-se os valores das temperaturas médias, máximas e mínimas obtidas em Montalegre no período de mínima temperatura exterior.

Quadro 8.7
TEMPERATURAS OPERATIVAS E DO AR NO CENÁRIO 8.2.1 NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Temperaturas operativas dos compartimentos e temperatura do ar exterior				
Local	Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Exterior	4,3	9,2	-0,8
	Desvão de cobertura	6,0	9,8	2,8
	Quarto	7,6	8,6	6,6

No Quadro 8.8 apresentam-se os valores das temperaturas médias, máximas e mínima das superfícies da cobertura e da esteira, obtidas em Montalegre no período considerado.

Quadro 8.8
TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA NO CENÁRIO 8.2.1 NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Temperaturas superficiais				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	5,5	13,8	0,1
	Face interior da cobertura oeste	5,5	13,4	0,3
	Face superior da esteira	6,6	8,2	5,1
	Face inferior da esteira	7,2	8,0	6,2

No Quadro 8.9 apresentam-se os valores médios e máximos dos fluxos de calor, através da totalidade da esteira por radiação, convecção e condução, obtidos em Montalegre nos períodos considerados.

Quadro 8.9
FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO NO CENÁRIO 8.2.1 NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Fluxos de calor: Esteira -> Quarto				
Local	Fluxo	Fluxo médio W	Fluxo descendente máximo W	Fluxo ascendente máximo W
Montalegre	Radiação	-43,6	-	-160,3
	Convecção	-21,7	-	-79,4
	Condução	-66,2	-	-242,6

Pela análise dos dados anteriores, relativa à localidade de Montalegre no período de menor temperatura anual, constata-se que a temperatura mínima no interior do quarto é 7,4°C superior à temperatura mínima exterior, não sendo alheio a este facto a inércia térmica, em especial da laje, visto que nestes cenários as paredes do quarto (exteriores e internas) estão isoladas termicamente pelo interior (ITICS), bem como o efeito do espaço de ar confinado pelo desvão de cobertura.

É também relevante referir que neste período os fluxos de calor por radiação, convecção e condução são sempre ascendentes do quarto para a esteira, sendo o maior o fluxo por condução e em seguida o por radiação. Obviamente que os fluxos de calor seriam bem maiores se o ambiente interior fosse climatizado.

É importante recordar que este cenário apresenta as janelas fechadas, ou seja, sem ganhos solares pelos vãos envidraçados, pois a ideia deste estudo é o de perceber o funcionamento dos ITRBEs com o mínimo possível de influências externas que relativizem e dissimulem os resultados do desempenho térmico deste tipo de isolamentos.

8.2.2 EDIFÍCIO COM ITRBE POR CIMA DA ESTEIRA PESADA

8.2.2.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

Neste cenário, a única diferença face ao 8.2.1, é que se colocou por cima da esteira o ITRBE constituído por 5 mm de espessura de PEF revestido nas duas faces com folhas de alumínio com emissividade igual a 0,06, supondo-se neste cenário que o ITRBE foi recentemente aplicado e que por isso não apresenta pó e outras sujidades na sua superfície.

No Quadro 8.10 apresentam-se as variações deste cenário de aplicação de ITRBE na esteira face ao cenário inicial 8.2.1 de sem qualquer tipo de isolamento, dos valores das temperaturas operativa médias, máximas e mínimas obtidas nas cinco localidades e nos períodos de máxima temperatura exterior.

Quadro 8.10
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.2 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas (cenário 8.2.2 face ao 8.2.1)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	+0,2	+3,3	-1,7
	Quarto	-0,4	+0,1	-0,2
Maia	Desvão de cobertura	+0,2	+3,3	-1,5
	Quarto	-0,3	+0,1	0,0
Beja	Desvão de cobertura	+0,3	+3,6	-1,9
	Quarto	-0,4	-0,5	-0,1
Petroлина	Desvão de cobertura	0,0	+4,1	-1,7
	Quarto	-0,4	-0,5	0,0
Dili	Desvão de cobertura	+0,5	+3,1	-0,5
	Quarto	-0,5	-0,3	-0,2

Pela análise do Quadro anterior, é de realçar que em todas as localidades, as temperaturas operativas médias e sobretudo as máximas do desvão aumentam com a aplicação de ITRBE na esteira, sendo que nas primeiras existe um aumento máximo de 0,5°C em Dili e nas segundas o aumento máximo foi de 4,1°C em Petroлина. Quanto à temperatura operativa mínima no desvão, verifica-se que a aplicação de ITRBE na esteira provoca o seu abaixamento, sendo que o maior deles ocorreu em Beja no valor de 1,9°C. Já quanto às temperaturas operativas do quarto, verifica-se que os valores médios diminuíram, mas de forma pouco significativa, em todas as localidades, sendo que o maior abaixamento ocorreu em Dili no valor de 0,5°C. Quanto aos valores máximos das temperaturas operativas no quarto, existiram localidades em que a mesma aumentou de forma praticamente residual (Montalegre e Maia) e outras em que diminuiu (0,3°C em Dili e 0,5°C em Beja e Petroлина). Quanto à temperatura mínima no quarto esta ou diminuiu ligeiramente (Montalegre, Beja e Dili) ou manteve-se (Maia e Petroлина).

No Quadro 8.11 apresentam-se as variações deste cenário de aplicação de ITRBE na esteira face ao cenário inicial 8.2.1 de sem qualquer tipo de isolamento, das temperaturas médias, máximas e mínimas das superfícies da cobertura e da esteira, obtidas nas cinco localidades e nos períodos considerados.

Quadro 8.11

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.2 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.2 face ao 8.2.1)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,9	-0,5
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+1,1	-0,6
	Face superior da esteira	-0,6	-0,5	-0,3
	Face inferior da esteira	-0,6	-1,5	-0,1
Maia	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,9	-0,4
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+1,2	-0,5
	Face superior da esteira	-0,4	-0,6	-0,1
	Face inferior da esteira	-0,4	-1,5	+0,4
Beja	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,9	-0,5
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+1,2	-0,7
	Face superior da esteira	-0,5	-0,5	-0,3
	Face inferior da esteira	-0,5	-1,6	+0,2
Petrópolis	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+1,1	-0,5
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+1,5	-0,6
	Face superior da esteira	-0,6	-0,9	-0,1
	Face inferior da esteira	-0,7	-2,0	+0,2
Dili	Face exterior da cobertura oeste	+0,2	+0,8	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,2	+1,1	-0,4
	Face superior da esteira	-0,7	-0,8	-0,2
	Face inferior da esteira	-0,8	-1,7	-0,1

Da análise dos valores do Quadro anterior, realça-se que com a aplicação de ITRBE na esteira pesada, as temperaturas máximas aumentam na cobertura tanto na face exterior como na interior, evidenciando-se o caso de Petrópolis com um aumento de 1,1°C na superfície exterior das telhas e de 1,5°C na sua superfície interior. Em relação à esteira pesada, evidencia-se a diminuição em todas as localidades, da temperatura, média e máxima, tanto da face superior como da face inferior (teto do quarto), chegando-se nesta a valores de abaixamento da temperatura máxima de 2°C (valor que terá algum significado em termos de temperatura média radiante e como tal em termos de conforto) em Petrópolis e da temperatura média de 0,8°C em Dili, não sendo alheio a este facto ser em Petrópolis que se verifica a temperatura exterior máxima mais elevada das cinco localidades e em Dili o homólogo mas para a temperatura média. Quanto à temperatura mínima ocorrida no teto do quarto, verifica-se que em algumas localidades o seu valor diminui (casos de Montalegre e Dili) e noutros aumenta (casos de Beja, Maia e Petrópolis), isto muito ligeiramente.

Por fim e no respeitante aos fluxos de calor, através da totalidade da esteira, devidos à radiação, convecção e condução, e igualmente face ao cenário anterior (8.2.1), apresentam-se, no Quadro 8.12 as variações dos correspondentes valores.

Quadro 8.12
VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.2 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Esteira -> Quarto (8.2.2 face a 8.2.1)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.2.2 (W)	8.2.1 (W)	ΔW (%)	8.2.2 (W)	8.2.1 (W)	ΔW (%)	8.2.2 (W)	8.2.1 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	19,5	40,6	-52,0	89,5	140,2	-36,2	-134,8	-153,0	-11,9
	Convecção	14,1	25,1	-43,8	52,5	76,7	-31,6	-63,3	-71,0	-10,8
	Condução	31,5	63,6	-50,5	139,5	214,3	-34,9	-203,2	-229,5	-11,5
Maia	Radiação	7,3	21,0	-65,2	69,6	117,0	-40,5	-138,7	-156,6	-11,4
	Convecção	6,8	13,9	-51,1	41,5	64,2	-35,4	-67,6	-76,3	-11,4
	Condução	12,4	33,2	-62,7	108,9	178,6	-39,0	-210,3	-235,8	-10,8
Beja	Radiação	23,0	42,2	-45,5	88,6	143,6	-38,3	-119,5	-141,5	-15,5
	Convecção	15,4	25,5	-39,6	53,5	79,1	-32,4	-57,1	-67,7	-15,7
	Condução	36,6	65,8	-44,4	139,4	219,8	-36,6	-181,2	-213,2	-15,0
Petroliña	Radiação	37,3	57,8	-35,5	97,0	164,7	-41,1	-134,6	-136,5	-1,4
	Convecção	23,0	33,8	-32,0	58,2	90,0	-35,3	-64,2	-64,6	-0,6
	Condução	58,8	89,7	-34,4	152,6	251,9	-39,4	-202,6	-204,6	-1,0
Dili	Radiação	36,3	67,7	-46,4	86,2	147,5	-41,6	-99,6	-94,8	+5,1
	Convecção	21,6	38,0	-43,2	50,2	80,3	-37,5	-47,4	-44,7	+6,0
	Condução	56,9	104,7	-45,7	134,6	226,0	-40,4	-149,8	-141,4	+5,9

Pela análise do Quadro 8.12, verifica-se que a aplicação do ITRBE na esteira provocou, em geral, uma significativa diminuição dos fluxos de calor médios e máximos descendentes. Verifica-se, também, que a diminuição do fluxo de calor por radiação é muito similar à diminuição do fluxo por condução, embora a primeira seja ligeiramente superior à segunda.

8.2.2.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

De maneira a se analisarem as consequências da aplicação de ITRBEs na esteira, mas agora num período de mínimas temperaturas exteriores anuais, realizou-se novamente a simulação para Montalegre e para esse período, de forma a comparar este cenário com a anterior já apresentada em 8.2.1, de não aplicação de qualquer tipo de isolamento.

Nos Quadros 8.13 e 8.14 apresentam-se as variações deste cenário de aplicação de ITRBE na esteira, face ao cenário inicial 8.2.1, sem qualquer tipo de isolamento, respetivamente, dos valores das temperaturas operativas interiores e das temperaturas das superfícies da cobertura e da esteira.

Quadro 8.13

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.2 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas (cenário 8.2.2 face ao 8.2.1)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	-0,2	+1,2	-1,2
	Quarto	+0,3	+0,5	+0,5

Quadro 8.14

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.2 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.2 face ao 8.2.1)				
Local	Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	+0,3	-0,4
	Face interior da cobertura oeste	0,0	+0,4	-0,4
	Face superior da esteira	+0,3	+0,3	+0,4
	Face inferior da esteira	+0,4	+0,1	+0,8

Verifica-se, pela análise dos dois Quadros anteriores, de que a aplicação de ITRBE por cima da esteira, face ao cenário homólogo, 8.2.1, sem qualquer tipo de isolamento térmico, provoca em termos médios uma diminuição de 0,2°C da temperatura operativa do desvão e um aumento de 0,3°C da temperatura operativa do quarto. Em relação às temperaturas máximas e mínimas operativas do quarto, ambas aumentam de 0,5°C e no desvão a máxima aumenta 1,2°C e a mínima diminui 1,2°C. Importa, ainda, referir que a temperatura média do teto do quarto, devido à aplicação do ITRBE na esteira, aumenta em média 0,4°C e quanto à mínima aumenta 0,8°C.

Por fim, e no respeitante aos fluxos de calor, através da totalidade da esteira, e igualmente face ao cenário anterior (8.2.1), apresentam-se no Quadro 8.15, as variações dos correspondentes valores.

Quadro 8.15

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.2 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Esteira -> Quarto (cenário 8.2.2 face ao 8.2.1)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.2.2 (W)	8.2.1 (W)	ΔW (%)	8.2.2 (W)	8.2.1 (W)	ΔW (%)	8.2.2 (W)	8.2.1 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	-27,6	-43,6	-36,7	-	-	-	-127,7	-160,3	-20,3
	Convecção	-13,3	-21,7	-38,7	3,3	-	-	-62,6	-79,4	-21,2
	Condução	-41,7	-66,2	-37,0	0,4	-	-	-193,1	-242,6	-20,4

Pela análise do Quadros 8.15, verifica-se que a aplicação do ITRBE na esteira pesada, provocou, em geral, uma significativa diminuição dos fluxos de calor (em termos médios na ordem dos 40% e no respeitante aos máximos ascendentes na ordem dos 20%). Realça-se que no respeitante aos fluxos de calor descendentes estes só existem na situação com ITRBE e no respeitante à convecção e condução.

8.2.3 EDIFÍCIO COM LÃ DE ROCHA COM 4 CM DE ESPESSURA POR CIMA DA ESTEIRA PESADA

8.2.3.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

Neste cenário colocou-se lã de rocha, de espessura igual a 4 cm, na face superior da esteira, e não se aplicou qualquer ITRBE, sendo que o objetivo principal é comparar o comportamento desta solução com a do cenário 8.2.2, ou seja com a aplicação de ITRBE na face superior da esteira.

Assim, nos Quadros 8.16 e 8.17, apresentam-se as variações deste cenário de aplicação de lã de rocha de 4 cm de espessura na esteira face ao cenário 8.2.2 de aplicação de ITRBE, respetivamente dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão bem como das temperaturas superficiais da cobertura e da esteira, obtidas nas cinco localidades e nos períodos de máxima temperatura exterior.

Quadro 8.16

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS DO, CENÁRIO 8.2.3 FACE AO 8.2.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas (cenário 8.2.3 face ao 8.2.2)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	+0,2	+1,6	-0,8
	Quarto	-0,1	+0,1	0,0
Maia	Desvão de cobertura	+0,1	+1,6	-0,7
	Quarto	0,0	+0,1	+0,1
Beja	Desvão de cobertura	+0,2	+1,7	-1,0
	Quarto	-0,1	+0,1	0,0
Petrolina	Desvão de cobertura	+0,2	+1,9	-0,9
	Quarto	-0,2	-0,1	+0,1
Dili	Desvão de cobertura	+0,3	+1,5	-0,2
	Quarto	-0,2	-0,2	-0,1

Quadro 8.17

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.3 FACE AO 8.2.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.3 face ao 8.2.2)				
Local	Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,2	-0,1
	Face interior da cobertura oeste	0,0	+0,3	-0,2
	Face superior da esteira	+1,2	+9,3	-4,7
	Face inferior da esteira	-0,1	-0,3	0,0
Maia	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,2	-0,1
	Face interior da cobertura oeste	0,0	+0,2	-0,2
	Face superior da esteira	+0,9	+9,5	-4,2
	Face inferior da esteira	0,0	-0,1	+0,1
Beja	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,2	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+0,4	-0,2
	Face superior da esteira	+1,1	+10,4	-5,5
	Face inferior da esteira	-0,1	-0,4	+0,1
Petrolina	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,2	-0,1
	Face interior da cobertura oeste	0,0	+0,3	-0,1
	Face superior da esteira	+0,7	+11,8	-4,7
	Face inferior da esteira	-0,2	-0,5	+0,1
Dili	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,2	-0,1
	Face interior da cobertura oeste	0,0	+0,3	0,0
	Face superior da esteira	+1,9	+9,2	-1,1
	Face inferior da esteira	-0,3	-0,5	-0,1

Pela análise do Quadro 8.16, infere-se que em termos de temperaturas operativas médias, os resultados entre o cenário 8.2.3 e 8.2.2 são muito similares. No respeitante às temperaturas máximas atingidas, verifica-se que em todas as localidades Portuguesas a lã de rocha provoca valores superiores, significativos no desvão de cobertura e residuais no quarto. Da análise do Quadro 8.17 é relevante apontar que em geral, com a aplicação da lã de rocha na esteira, existe um abaixamento da temperatura média e máxima do teto do quarto. Já a face superior da esteira, com a lã de rocha, apresenta acréscimos significativos na sua temperatura máxima, chegando-se a valores de 11,8°C em Petrolina, na face superior deste isolamento.

Por fim e no respeitante aos fluxos de calor, através da totalidade da esteira, e igualmente face ao cenário anterior (8.2.2), apresentam-se no Quadro 8.18 as variações dos correspondentes valores.

Quadro 8.18
VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.3 FACE AO 8.2.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Esteira -> Quarto (cenário 8.2.3 face ao 8.2.2)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.2.3 (W)	8.2.2 (W)	ΔW (%)	8.2.3 (W)	8.2.2 (W)	ΔW (%)	8.2.3 (W)	8.2.2 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	15,9	19,5	-18,5	84,4	89,5	-5,7	-128,0	-134,8	-5,0
	Convecção	12,2	14,1	-13,5	51,6	52,5	-1,7	-59,8	-63,3	-5,5
	Condução	26,1	31,5	-17,1	133,4	139,5	-4,4	-193,0	-203,2	-5,0
Maia	Radiação	7,3	7,3	0,0	66,3	69,6	-4,7	-129,0	-138,7	-7,0
	Convecção	6,8	6,8	0,0	40,0	41,5	-3,6	-62,7	-67,6	-7,2
	Condução	12,4	12,4	0,0	104,5	108,9	-4,0	-195,7	-210,3	-6,9
Beja	Radiação	20,1	23,0	-12,6	84,3	88,6	-4,9	-110,0	-119,5	-7,9
	Convecção	13,9	15,4	-9,7	52,0	53,5	-2,8	-52,4	-57,1	-8,2
	Condução	32,2	36,6	-12,0	133,8	139,4	-4,0	-166,8	-181,2	-7,9
Petrolina	Radiação	29,5	37,3	-20,9	87,1	97,0	-10,2	-135,8	-134,6	+0,9
	Convecção	18,9	23,0	-17,8	54,0	58,2	-7,2	-65,0	-64,2	+1,2
	Condução	46,9	58,8	-20,2	138,6	152,6	-9,2	-204,9	-202,6	+1,1
Dili	Radiação	25,8	36,3	-28,9	72,3	86,2	-16,1	-101,4	-99,6	+1,8
	Convecção	16,2	21,6	-25,0	43,8	50,2	-12,7	-48,5	-47,4	+2,3
	Condução	41,0	56,9	-27,9	114,6	134,6	-14,9	-152,8	-149,8	+2,0

Já, em termos, de fluxos de calor por radiação médios da esteira para o quarto, verifica-se que estes são em geral menores com a aplicação da lã de rocha do que com o ITRBE. O maior abaixamento de fluxos médios de calor por radiação da esteira para o quarto, verifica-se em

Dili com uma diminuição de 28,9%. Já no respeitante aos fluxos de radiação máximos descendentes, verifica-se que em todas as localidades existiu um descrécimo com a aplicação dos 4 cm de lã de rocha, sendo o maior deles em Dili, com uma diminuição de 16,1%. Em relação aos valores máximos dos fluxos de radiação ascendentes, existiu, para as três localidades Portuguesas, algum descrécimo (entre 5 e 7,9%) com a aplicação de 4 cm de lã de rocha face ao uso do ITRBE. No entanto, já em Petrolina e Dili este fluxo é ligeiramente superior com os 4 cm de lã de rocha do que com o ITRBE, ambos aplicados na esteira.

O maior abaixamento de fluxos médios de calor por convecção da esteira para o quarto, verificou-se em Dili com uma diminuição de 25,0%. Já no respeitante aos valores máximos dos fluxos descendentes por convecção, verifica-se que em todas as localidades existiu um descrécimo com a aplicação dos 4 cm de lã de rocha, sendo o maior deles em Dili, com uma diminuição de 12,7%. Em relação aos valores máximo dos fluxos ascendentes por convecção, existiu, para as três localidades Portuguesas, algum descrécimo (entre 5,5 e 8,2%) com a aplicação de 4 cm de lã de rocha face ao uso do ITRBE. No entanto, já em Petrolina e Dili este fluxo é ligeiramente superior com os 4 cm de lã de rocha do que com o ITRBE, ambos aplicados na esteira.

O maior abaixamento de fluxos médios de calor por convecção da esteira para o quarto, verificou-se em Dili com uma diminuição de 27,9%. Já no respeitante aos fluxos de calor por condução máximos descendentes, existiu, para todas as localidades, um descrécimo (entre 4,0 e 14,9%) com a aplicação de 4 cm de lã de rocha face ao uso do ITRBE. No respeitante aos valores máximos dos fluxos ascendentes por condução, verifica-se que em todas as localidades Portuguesas existiu um descrécimo com a aplicação dos 4 cm de lã de rocha, sendo o maior deles em Beja, com uma diminuição de 7,9%, sendo que em Dili e Petrolina existiu um aumento ligeiro desse fluxo.

Verifica-se, pois, que embora, sob o ponto de vista geral, no período de máximas temperaturas exteriores, o uso de 4 cm de lã de rocha seja melhor do que o uso de ITRBE, ambos aplicados na esteira, a diferença de comportamento entre ambos não é muito significativa.

8.2.3.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

De seguida, e de forma a se analisar a diferença de comportamento entre a aplicação dos 4 cm de lã de rocha (cenário 8.2.3) com a aplicação de ITRBE (cenário 8.2.2), ambos sobre a esteira, mas agora numa situação de temperaturas exteriores mais baixas (inverno), realizou-se novamente a simulação para Montalegre e para o período anual de menores temperaturas.

Nos Quadros 8.19 e 8.20 apresentam-se as variações deste cenário 8.2.3 para o cenário 8.2.2, respetivamente, dos valores das temperaturas operativas do quarto e do desvão, bem como das temperaturas superficiais da cobertura e da esteira.

Quadro 8.19

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.3 FACE AO 8.2.2, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas (cenário 8.2.3 face ao 8.2.2)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	-0,2	+0,4	-0,7
	Quarto	+0,2	+0,2	+0,2

Quadro 8.20

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.3 FACE AO 8.2.2, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.3 face ao 8.2.2)				
Local	Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	0,0	0,0	-0,1
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	+0,1	-0,2
	Face superior da esteira	-1,1	+2,6	-3,9
	Face inferior da esteira	+0,3	+0,2	+0,4

Verifica-se que a aplicação de lã de rocha por cima da esteira, face ao cenário homólogo, 8.2.2, de aplicação de ITRBE no mesmo local, provoca em termos médios uma diminuição de 0,2°C da temperatura operativa do desvão e um aumento de 0,2°C da temperatura operativa do quarto. Em relação às temperaturas máximas e mínimas do quarto, estas aumentam 0,2°C e no desvão a máxima aumenta 0,4°C e a mínima diminui 0,7°C.

Refere-se, ainda, que a temperatura média do teto do quarto, devido à aplicação da lã de rocha na esteira, aumenta em média 0,3°C e quanto à mínima aumenta 0,4°C.

Já no respeitante aos fluxos de calor, através da totalidade da esteira, e igualmente face ao cenário anterior (8.2.2), apresentam-se no Quadro 8.21, as variações dos correspondentes valores.

Quadro 8.21

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.3 FACE AO 8.2.2, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Esteira -> Quarto (cenário 8.2.3 face ao 8.2.2)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.2.3 (W)	8.2.2 (W)	ΔW (%)	8.2.3 (W)	8.2.2 (W)	ΔW (%)	8.2.3 (W)	8.2.2 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	-17,4	-27,6	-37,0	11,2	-	-	-112,7	-127,7	-11,7
	Convecção	-8,0	-13,3	-39,8	9,6	3,3	+190,9	-54,8	-62,6	-12,5
	Condução	-26,1	-41,7	-37,4	19,6	0,4	+4800,0	-170,2	-193,1	-11,9

Pela análise do Quadros 8.21, verifica-se que a aplicação de lã de rocha na esteira pesada, face à aplicação de ITRBE, provocou uma diminuição dos fluxos de calor médios. Em relação aos fluxos de calor máximos descendentes, realça-se no que concerne à condução através da esteira, que com a aplicação de ITRBE originaram-se instantes em que o fluxo é substancialmente inferior. Já no que concerne aos valores máximos do fluxo ascendente, verifica-se que existiu uma diminuição com o uso de 4 cm de lã de rocha na esteira pesada.

8.2.4 EDIFÍCIO INTEGRANDO ESTEIRA PESADA E COM ITRBE POR BAIXO DAS VERTENTES DA COBERTURA

8.2.4.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

Neste cenário, a única diferença face ao 8.2.1, é que se colocou por baixo das vertentes em telha cerâmica, apoiada em estrutura de madeira, um ITRBE constituído por 5 mm de espessura de PEF revestido nas duas faces com folhas de alumínio com emissividade igual a 0,06, supondo-se neste cenário que o ITRBE foi recentemente aplicado e que por isso não apresenta pó e outras sujidades na sua superfície superior. Entre o ITRBE e a telha cerâmica

existe uma caixa de ar de 4 cm, que igualmente, tal e qual o desvão de cobertura, se considera ventilado no valor de 3 RPH.

No Quadro 8.22 apresentam-se as variações deste cenário de aplicação de ITRBE sob as telhas de cobertura face ao cenário inicial 8.2.1, sem qualquer tipo de isolamento, dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão obtidas nas cinco localidades.

Quadro 8.22
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas (cenário 8.2.4 face ao 8.2.1)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	-2,1	-7,6	+2,3
	Quarto	-0,9	-0,2	-0,5
Maia	Desvão de cobertura	-1,5	-7,4	2,3
	Quarto	-0,6	-0,1	-0,2
Beja	Desvão de cobertura	-1,8	-8,3	+2,9
	Quarto	-0,8	-0,8	-0,4
Petroлина	Desvão de cobertura	-1,5	-9,2	+2,3
	Quarto	-0,8	-0,8	-0,3
Dili	Desvão de cobertura	-2,3	-7,5	+0,1
	Quarto	-0,9	-0,6	-0,4

Pela análise do Quadro anterior é de realçar que em todas as localidades as temperaturas operativas médias e sobretudo as máximas do desvão, diminuem com a aplicação de ITRBE sob as telhas (situação oposta à aplicação de ITRBE na esteira, em que as temperaturas no desvão aumentaram face ao cenário 8.2.1), sendo que nas primeiras existe uma diminuição máxima de 2,3°C em Dili e nas segundas o decréscimo máximo foi de 9,2°C em Petroлина. Quanto à temperatura operativa mínima no desvão, verifica-se que com a aplicação de ITRBE sob as telhas, existe o seu aumento em relação ao cenário 8.2.1, sendo que o maior deles ocorreu em Beja no valor de 2,9°C, ou seja com ITRBE sob as telhas as temperaturas do desvão durante a noite não diminuem tanto. Já quanto às temperaturas operativas do quarto, verifica-se que os valores médios diminuíram em todas as localidades, sendo que o maior abaixamento ocorreu em Montalegre e Dili no valor de 0,9°C (recorda-se que o máximo

abaixamento que a aplicação de ITRBE na esteira provocou foi de 0,5°C em Dili). Quanto aos valores máximos das temperaturas operativas no quarto, as mesmas diminuíram em todas as localidades, sendo o abaixamento máximo em Beja e Petrolina no valor de 0,8°C (recorda-se que o máximo abaixamento que a aplicação de ITRBE na esteira provocou foi de 0,5°C). Quanto à temperatura mínima no quarto esta diminuiu, sendo que o maior decréscimo foi de 0,5°C em Montalegre.

No Quadro 8.23 apresentam-se as variações deste cenário de aplicação de ITRBE sob as telhas, face ao cenário inicial 8.2.1, sem qualquer tipo de isolamento, das temperaturas médias, máximas e mínimas das superfícies da cobertura e da esteira, obtidas nas cinco localidades e nos períodos considerados.

Quadro 8.23
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.4 face ao 8.2.1)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	+0,2	+1,8	-0,8
	Face interior da cobertura oeste	+0,3	+2,3	-1,1
	Face superior da esteira	-1,8	-4,3	+0,4
	Face inferior da esteira	-1,3	-2,4	-0,6
Maia	Face exterior da cobertura oeste	+0,2	+1,7	-0,7
	Face interior da cobertura oeste	+0,3	+2,3	-0,9
	Face superior da esteira	-1,3	-4,1	+0,8
	Face inferior da esteira	-0,9	-2,2	+0,1
Beja	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+1,8	-0,9
	Face interior da cobertura oeste	+0,3	+2,5	-1,2
	Face superior da esteira	-1,7	-4,6	+0,7
	Face inferior da esteira	-1,2	-2,5	-0,3
Petrolina	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+2,1	-0,8
	Face interior da cobertura oeste	+0,2	+2,9	-1,0
	Face superior da esteira	-1,5	-5,2	+0,3
	Face inferior da esteira	-1,2	-2,8	-0,3
Dili	Face exterior da cobertura oeste	+0,3	+1,6	-0,4
	Face interior da cobertura oeste	+0,3	+2,2	-0,7
	Face superior da esteira	-2,0	-4,4	-0,5
	Face inferior da esteira	-1,4	-2,4	-0,5

Da análise dos valores do Quadro 8.23, realça-se que com a aplicação de ITRBE sob as telhas de cobertura, as temperaturas máximas aumentaram na cobertura tanto na face exterior como na interior, evidenciando-se o caso de Petrolina com um aumento de 2,1°C na superfície exterior das telhas (note-se que no cenário ITRBE sobre a esteira este aumento foi de somente 1,1°C) e de 2,9°C na sua superfície interior (note-se que no cenário ITRBE sobre a esteira este aumento foi de somente 1,5°C). Em relação à esteira pesada, evidencia-se a diminuição em todas as localidades, da temperatura, média e máxima, tanto da face superior como da face inferior (teto do quarto), chegando-se nesta a valores de abaixamento da temperatura máxima de 2,8°C em Petrolina (note-se que no cenário ITRBE sobre a esteira este decréscimo foi de somente 2°C) e da temperatura média de 1,4°C em Dili (note-se que no cenário ITRBE sobre a esteira este decréscimo foi de somente 0,8°C). Quanto à temperatura mínima ocorrida no teto do quarto, verifica-se que em todas as localidades, com exceção da Maia (que sofre um aumento de 0,1°C), o seu valor diminui.

Já no respeitante aos fluxos de calor, através da totalidade da esteira, e igualmente face ao cenário 8.2.1, apresentam-se no Quadro 8.24 as variações dos correspondentes valores.

Quadro 8.24

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Esteira -> Quarto (cenário 8.2.4 face ao 8.2.1)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.2.4 (W)	8.2.1 (W)	ΔW (%)	8.2.4 (W)	8.2.1 (W)	ΔW (%)	8.2.4 (W)	8.2.1 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	-5,5	40,6	*	63,2	140,2	-54,9	-151,5	-153,0	-1,0
	Convecção	1,0	25,1	-96,0	40,7	76,7	-46,9	-71,8	-71,0	+1,1
	Condução	-6,6	63,6	*	101,4	214,3	-52,7	-228,4	-229,5	-0,5
Maia	Radiação	-11,5	21,0	*	46,9	117,0	-59,9	-148,9	-156,6	-4,9
	Convecção	-3,1	13,9	*	30,9	64,2	-51,9	-73,2	-76,3	-4,1
	Condução	-16,2	33,2	*	75,4	178,6	-57,8	-226,2	-235,8	-4,1
Beja	Radiação	-0,9	42,2	*	63,4	143,6	-55,8	-134,1	-141,5	-5,2
	Convecção	2,9	25,5	-88,6	41,8	79,1	-47,2	-65,0	-67,7	-4,0
	Condução	0,2	65,8	-99,7	102,4	219,8	-53,4	-203,6	-213,2	-4,5
Petrolina	Radiação	17,5	57,8	-69,7	72,6	164,7	-55,9	-147,3	-136,5	+7,9
	Convecção	12,6	33,8	-62,7	46,7	90,0	-48,1	-71,0	-64,6	+9,9
	Condução	28,6	89,7	-68,1	116,5	251,9	-53,8	-222,6	-204,6	+8,8
Dili	Radiação	16,2	67,7	-76,1	63,5	147,5	-56,9	-113,4	-94,8	+19,6
	Convecção	11,1	38,0	-70,8	39,2	80,3	-51,2	-54,7	-44,7	+22,4
	Condução	26,3	104,7	-74,9	101,1	226,0	-55,3	-171,0	-141,4	+20,9

* Inversão do sentido do fluxo de calor.

Verifica-se que neste cenário 8.2.4 existem trocas de sentido de fluxo médio de calor, situação que no caso do cenário de aplicação de ITRBE sobre a esteira não acontecia. É relevante referir que, nas situações de troca de sentido de fluxo médio, passou-se, neste cenário 8.2.4, de fluxo descendente para ascendente, realçando-se, assim, de que nestes casos, o fluxo ascendente predominantemente em período noturno é superior ao fluxo descendente predominantemente diurno. Igualmente é de realçar de que nas situações em que não existe inversão de fluxo, e no que concerne ao fluxo entre a esteira pesada e o quarto, de que com a aplicação de ITRBE sob as telhas existe uma significativa diminuição desse valor em relação ao cenário de aplicação de ITRBE sobre a esteira, exemplifica-se o caso de Dili em que o fluxo de radiação médio descendente passa de uma redução de 46,4% (do cenário 8.2.1 para 8.2.2) para 76,1% (do cenário 8.2.1 para 8.2.4).

Comparando, agora, este cenário 8.2.4 (ITRBE sob a telha de cobertura) com a colocação da lâ de rocha de 4 cm de espessura sobre a esteira pesada (cenário 8.2.3), com ambas as situações considerando renovação do ar do desvão no valor de 3 RPH, apresentam-se no Quadro 8.25, as variações deste cenário 8.2.4 face ao cenário 8.2.3, dos valores das temperaturas operativas do quarto e do desvão, obtidas nas cinco localidades e nos períodos de máxima temperatura exterior.

Quadro 8.25
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.4 face ao 8.2.3)				
Local	Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Desvão de cobertura	-2,5	-12,5	+4,8
	Quarto	-0,4	-0,4	-0,3
Maia	Desvão de cobertura	-1,8	-12,3	+4,5
	Quarto	-0,3	-0,3	-0,3
Beja	Desvão de cobertura	-2,3	-13,6	+5,8
	Quarto	-0,3	-0,4	-0,3
Petrolinea	Desvão de cobertura	-1,7	-15,2	+4,9
	Quarto	-0,2	-0,2	-0,4
Dili	Desvão de cobertura	-3,1	-12,1	+0,8
	Quarto	-0,2	-0,1	-0,1

Pelos resultados do Quadro anterior, conclui-se que a solução de colocar ITRBE sob as telhas de cobertura é mais eficiente na minoração das temperaturas operativas do desvão e do quarto no período de maiores temperaturas anuais, em especial no que respeita ao desvão. Verifica-se que a aplicação de ITRBE sob as telhas, face à aplicação de 4 cm de lã de rocha sobre a esteira, permite em termos médios uma diminuição da temperatura no quarto de 0,4°C em Montalegre e uma diminuição da temperatura no desvão de cobertura de 3,1°C em Dili. Já quanto aos valores máximos da temperatura operativa no desvão é relevante apontar a diminuição de 15,2°C ocorrida em Petrolina.

No Quadro 8.26 apresentam-se as variações deste cenário 8.2.4, face ao cenário 8.2.3, das temperaturas das superfícies da cobertura e da esteira, obtidas nas cinco localidades.

Quadro 8.26
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.4 face ao 8.2.3)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,7	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,2	+0,9	-0,3
	Face superior da esteira	-2,4	-13,1	+5,4
	Face inferior da esteira	-0,6	-0,6	-0,5
Maia	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,6	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,2	+0,9	-0,2
	Face superior da esteira	-1,8	-13,0	+5,1
	Face inferior da esteira	-0,5	-0,6	-0,4
Beja	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,7	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+0,9	-0,3
	Face superior da esteira	-2,3	-14,5	+6,5
	Face inferior da esteira	-0,6	-0,5	-0,6
Petrolina	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,8	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+1,1	-0,3
	Face superior da esteira	-1,6	-16,1	+5,1
	Face inferior da esteira	-0,3	-0,3	-0,6
Dili	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,6	-0,1
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+0,8	-0,3
	Face superior da esteira	-3,2	-12,8	+0,8
	Face inferior da esteira	-0,3	-0,2	-0,3

Pela análise do Quadro anterior, verifica-se que a temperatura superficial no teto do quarto é menor com o uso de ITRBE sob as telhas do que com o uso de 4 cm de lã de rocha sobre a

esteira pesada, chegando-se, em termos médios, a decréscimos de 0,6°C em Montalegre e Beja e em termos máximos a decréscimos de 0,6°C em Montalegre e na Maia.

Já em relação aos fluxos de calor, verifica-se que por exemplo o fluxo médio de radiação do teto para o quarto, em Petrolina, ao passar-se da aplicação sobre a esteira pesada, de lã de rocha de 4 cm de espessura para a aplicação de ITRBE sob as telhas de cobertura, diminui 40,7%.

É pois evidente, que nas condições analisadas e no período das máximas temperaturas exteriores, existe vantagem em colocar ITRBE sob as vertentes da cobertura face a colocar 4 cm de lã de rocha sobre a esteira.

8.2.4.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

De seguida e de forma a se analisar as consequências da aplicação do ITRBE sob as telhas de cobertura, mas agora numa situação de temperaturas exteriores baixas (inverno), e igualmente sem climatização da fração, realizou-se novamente a simulação para Montalegre e para o período anual de menores temperaturas, de forma a comparar esta situação com a anterior já apresentada em 8.2.1, sem aplicação de qualquer tipo de isolamento.

Nos Quadros 8.27 e 8.28 apresentam-se as variações deste cenário de aplicação de ITRBE sob as telhas face ao cenário 8.2.1, respetivamente, dos valores das temperaturas operativas do quarto e do desvão, bem como das temperaturas superficiais da cobertura e da esteira.

Quadro 8.27

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.4 face ao 8.2.1)				
Local	Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Desvão de cobertura	+0,9	-1,4	+2,7
	Quarto	+0,3	+0,5	+0,6

Quadro 8.28

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.4 face ao 8.2.1)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	+0,6	-0,6
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	+0,8	-0,8
	Face superior da esteira	+0,8	-0,3	+1,6
	Face inferior da esteira	+0,5	+0,1	+0,9

Verifica-se que a aplicação de ITRBE sob as telhas da cobertura, face ao cenário homólogo, 8.2.1, sem qualquer tipo de isolamento térmico, provocou, em termos médios, um aumento da temperatura do desvão de 0,9°C (recorda-se que o ITRBE sobre a esteira – cenário 8.2.2, provocou face ao cenário inicial 8.2.1, uma diminuição de 0,2°C) e um aumento de 0,3°C da temperatura do quarto (a mesma situação do ITRBE sobre a esteira). Em relação às temperaturas máximas e mínimas do quarto, estas aumentaram respetivamente 0,5°C e 0,6°C (muito similar ao cenário 8.2.2) e no desvão a máxima diminui 1,4°C (recorda-se que o ITRBE sobre a esteira provocou um aumento de 1,2°C) e a mínima aumentou 2,7°C (diminuiu 1,2°C no cenário 8.2.2). Verifica-se, assim, que a aplicação de ITRBE sob as telhas, provoca no quarto, temperaturas operativas similares ao cenário da colocação do ITRBE sobre a esteira, mas no desvão a temperatura operativa média e mínima aumentam. É, ainda, relevante referir que a temperatura média do teto do quarto, devido à aplicação do ITRBE na esteira, e face ao cenário 8.2.1, aumenta em média 0,5°C e quanto à mínima aumenta 0,9°C, situação muito similar ao que aconteceu com o cenário 8.2.2 face ao 8.2.1.

Desta análise, tanto em período de verão como de inverno, pode-se concluir que a aplicação de ITRBE sob as telhas da cobertura, face ao cenário de sem qualquer tipo de isolamento, tem resultados mais apreciáveis no período de verão do que no período de inverno e que é mais benéfica do que a colocação de ITRBE sobre a esteira, isto, mesmo, sem ter em conta o impacto da acumulação de pó e sujidades em especial na posição do ITRBE sobre a esteira.

De seguida e de forma a se comparar igualmente os resultados da aplicação do ITRBE sob as telhas de cobertura com a aplicação de lã de rocha sobre a esteira pesada (cenário 8.2.3), apresentam-se, no Quadro 8.29, as respetivas variações dos valores das temperaturas

operativas obtidas no quarto e no desvão de cobertura e no Quadro 8.30 as das temperaturas das superfícies da cobertura e da esteira.

Quadro 8.29

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.3, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.4 face ao 8.2.3)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	1,3	-3,0	4,6
	Quarto	-0,2	-0,2	-0,1

Quadro 8.30

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.4 FACE AO 8.2.3, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.4 face ao 8.2.3)				
Local	Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,3	-0,1
	Face interior da cobertura oeste	0,0	+0,3	-0,2
	Face superior da esteira	+1,6	-3,2	+5,1
	Face inferior da esteira	-0,2	-0,2	-0,3

Verifica-se que a aplicação de ITRBE sob as telhas da cobertura, face à colocação de 4 cm de lã de rocha sobre a esteira, provoca em termos médios, no desvão, um aumento da temperatura em 1,3°C, sendo que no quarto existe um ligeiro decréscimo, tanto na temperatura operativa como superficial do respetivo teto.

8.2.5 EDIFÍCIO COM ESTEIRA LEVE E SEM QUALQUER TIPO DE ISOLAMENTO TÉRMICO NA COBERTURA

8.2.5.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

Neste cenário, em relação ao 8.2.1, em vez de laje de esteira aligeirada de vigotas de betão pré-esforçado (esteira pesada), existe uma esteira leve, constituída por placas de gesso cartonado com 1,3 cm de espessura ($U_{\text{descendente}} = 2,55 \text{ W/(m}^2\text{°C)}$ e $U_{\text{ascendente}} = 3,97 \text{ W/(m}^2\text{°C)}$).

De seguida, nas Figuras 8.30 a 8.34 apresentam-se, os gráficos de temperaturas atingidas para este cenário nos cinco locais considerados e nos períodos de máxima temperatura exterior.

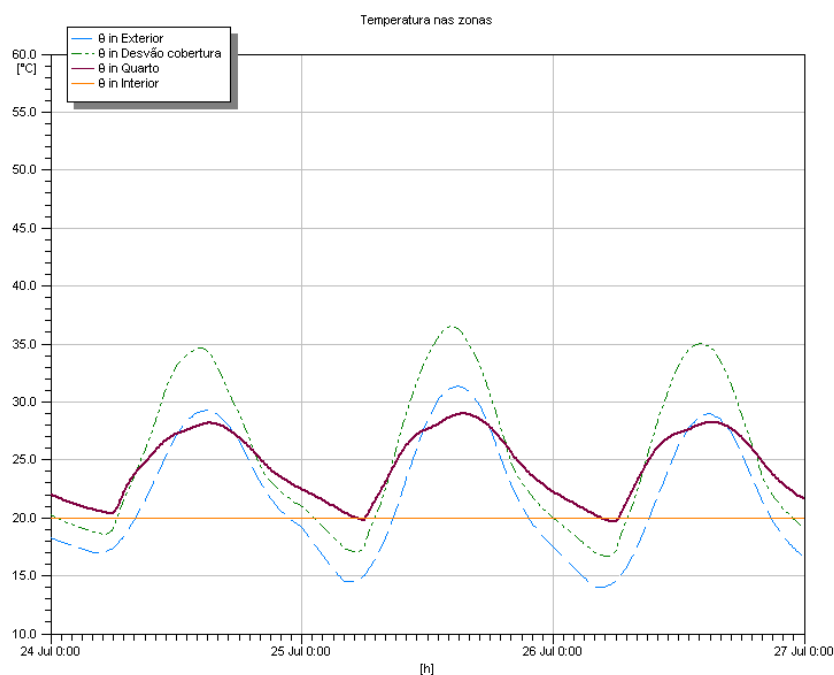


Figura 8.30
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.5 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

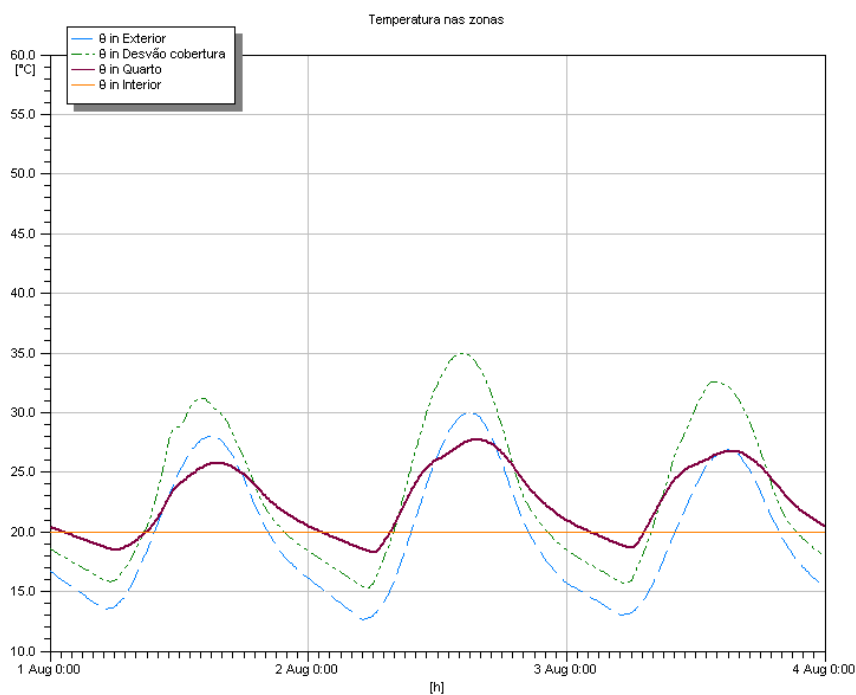


Figura 8.31
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.5 E PARA A MAIA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

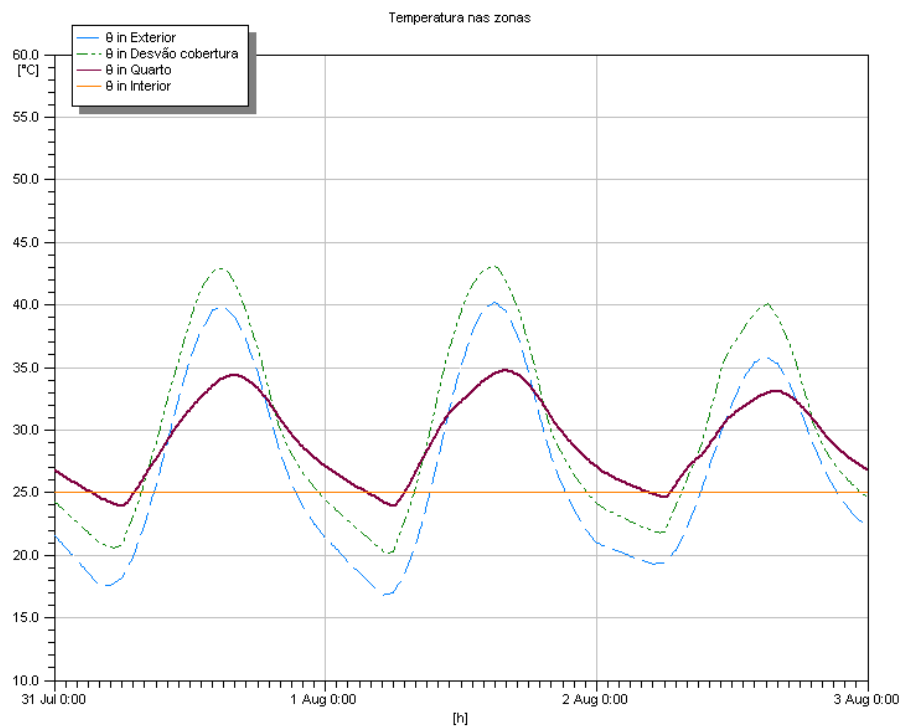


FIGURA 8.32
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.5 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

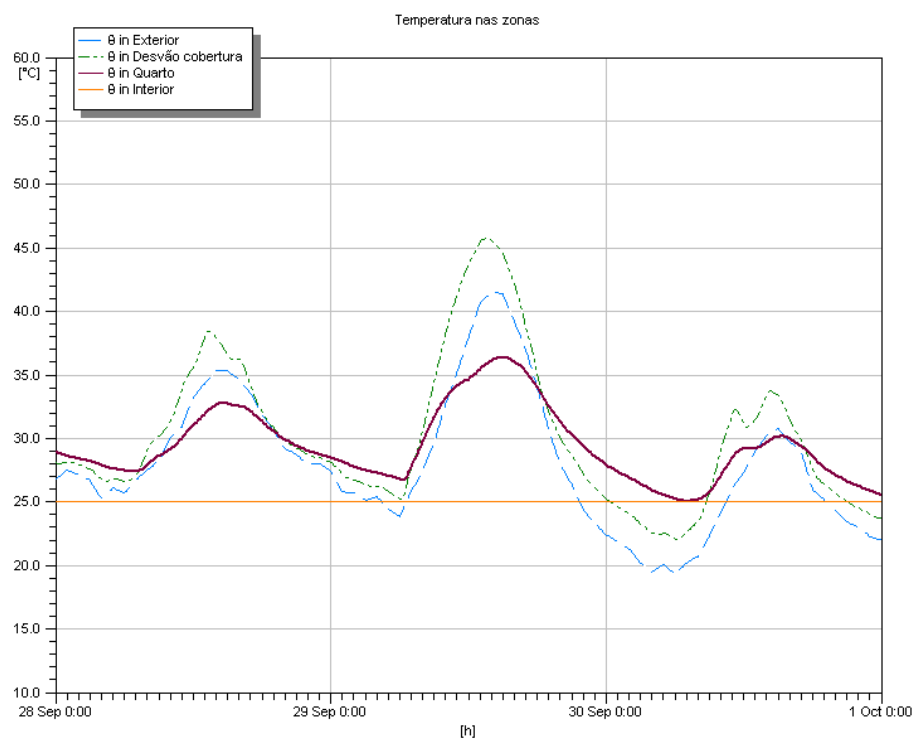


Figura 8.33
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.5 E PARA PETROLINA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

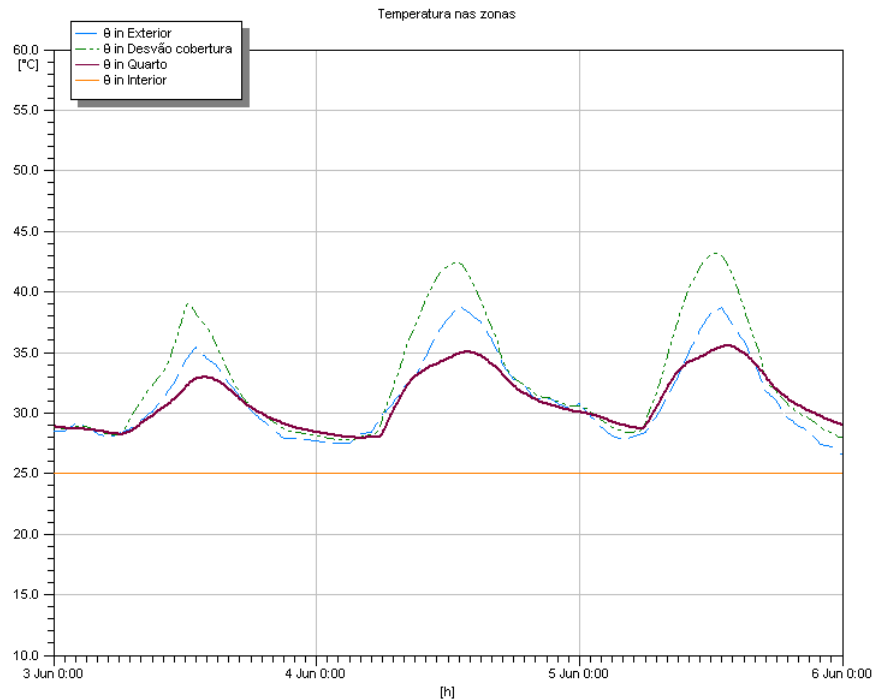


Figura 8.34
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.2.5 E PARA DILI NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Pela análise dos gráficos das Figuras anteriores, e comparando com os homólogos do cenário 8.2.1, é por demais evidente que, devido à diminuição da inércia térmica, o uso de uma esteira leve resulta numa maior variação da temperatura operativa no quarto bem como no desvão de cobertura, face ao uso de uma esteira pesada. Assim, durante o dia e no período mais quente, as temperaturas operativas do quarto e do desvão atingem valores mais elevados e durante a noite atingem valores mais baixos, sendo que se pode inferir que o uso de uma esteira leve provoca mais desconforto térmico durante os períodos mais quentes no exterior, mas provoca mais conforto durante os períodos menos quentes, ou seja durante a noite (isto quando a ocorrência de uma temperatura mais baixa proporcionar mais conforto). Assim, em edifícios que são usados predominantemente à noite, o uso de esteiras leves é mais favorável durante o verão ou em locais com valores de temperatura permanentemente elevada durante grande parte do ano.

No Quadro 8.31 apresentam-se as variações deste cenário de esteira leve sem qualquer isolamento face ao cenário inicial 8.2.1, dos valores das temperaturas operativas médias,

máximas e mínimas, obtidas nas cinco localidades e nos períodos de máxima temperatura exterior.

Quadro 8.31

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.5 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas (cenário 8.2.5 face ao 8.2.1)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	-0,2	+2,3	-1,9
	Quarto	+0,1	+3,6	-3,0
Maia	Desvão de cobertura	-0,1	+2,6	-1,5
	Quarto	+0,1	+3,9	-2,4
Beja	Desvão de cobertura	-0,1	+2,7	-2,1
	Quarto	0,0	+4,3	-3,2
Petrolina	Desvão de cobertura	-0,5	+2,8	-2,1
	Quarto	-0,3	+4,6	-2,3
Dili	Desvão de cobertura	-0,2	+1,9	-1,0
	Quarto	+0,3	+3,2	-1,1

Verifica-se, assim, como seria de esperar, que o uso da esteira leve, face ao uso da esteira pesada, sob o ponto de vista de temperaturas médias, não implica grandes variações, sobretudo no quarto, sendo em Beja a variação nula, em Petrolina a esteira leve implica menos 0,3°C e em Dili mais 0,3°C do que o uso de esteira pesada. Já quanto ao valor das temperaturas operativas máximas, verifica-se que o uso da esteira leve implica valores substancialmente maiores que a esteira pesada, atingindo-se em Petrolina uma diferença de 4,6°C. No respeitante aos valores das temperaturas operativas mínimas, que ocorrem durante a noite, o uso da esteira leve implica valores mais baixos, sendo que a diferença mais relevante ocorreu em Beja com um diferencial de 3,2°C. Em relação às temperaturas operativas no desvão verifica-se que os diferenciais em termos de valores máximos e mínimos são inferiores ao ocorrido no quarto, não sendo alheio a este facto a menor inércia térmica da esteira leve e ao facto de que o desvão de cobertura tem uma ventilação mais elevada do que o quarto.

No Quadro 8.32 apresentam-se as variações deste cenário de esteira leve sem qualquer isolamento, face ao cenário inicial 8.2.1, dos valores das temperaturas das superfícies da cobertura e da esteira, obtidas nas cinco localidades e nos períodos considerados.

Quadro 8.32

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.5 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.5 face ao 8.2.1)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,5	-0,5
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	+0,6	-0,6
	Face superior da esteira	-0,2	+4,5	-4,0
	Face inferior da esteira	+0,1	+5,7	-4,7
Maia	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,6	-0,3
	Face interior da cobertura oeste	0,0	+0,8	-0,4
	Face superior da esteira	0,0	+5,0	-3,1
	Face inferior da esteira	+0,2	+5,9	-3,7
Beja	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	+0,5	-0,5
	Face interior da cobertura oeste	0,0	+0,8	-0,6
	Face superior da esteira	-0,3	+5,4	-4,4
	Face inferior da esteira	+0,1	+6,6	-5,2
Petrolina	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	+0,6	-0,5
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	+0,8	-0,6
	Face superior da esteira	-0,7	+5,5	-3,8
	Face inferior da esteira	-0,5	+7,0	-4,0
Dili	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,4	-0,3
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	+0,6	-0,5
	Face superior da esteira	-0,1	+4,0	-1,7
	Face inferior da esteira	+0,4	+5,2	-1,6

Pela análise do Quadro anterior, verifica-se que em termos médios, o uso de uma esteira leve face a uma esteira pesada, não resulta em grandes alterações no que concerne à temperatura superficial do teto do quarto, sendo que as maiores variações ocorreram em Dili e em Petrolina, na primeira a esteira leve implica uma temperatura superior em 0,4°C e na segunda uma temperatura inferior em 0,5°C, o que não deixa de ser este facto relevante pois verifica-se que em locais que atingem temperaturas muito elevadas, mas com alguma variação, como é o caso de Petrolina, em termos de temperatura superficial média do teto, pode ser mais favorável o uso de esteira leve do que esteira pesada, pois na última a inércia térmica tem um papel preponderante em termos de acréscimo de temperatura. Realça-se que em Petrolina a temperatura máxima no teto do quarto é, com esteira leve, superior em 7°C ao uso de esteira pesada (sendo que em termos de temperatura radiante esta diferença é muito relevante), enquanto a temperatura mínima é inferior em 4°C. Esta situação particular que se passa em Petrolina é aliás visível igualmente pelos valores dos fluxos de calor entre a esteira e o quarto,

em que em média com a esteira leve são menores do que com a esteira pesada, existindo reduções na radiação, convecção e condução de respetivamente 32,5%; 29% e 32,2%.

8.2.5.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

De seguida e de forma a se analisar as consequências da existência de um esteira leve em relação a uma esteira pesada, mas agora numa situação de temperaturas exteriores mais baixas no ano, realizou-se novamente a simulação para Montalegre e para o período anual de menores temperaturas, de forma a comparar esta situação com a anterior já apresentada em 8.2.1, da existência de esteira pesada.

Nos Quadros 8.33 e 8.34 apresentam-se as variações deste cenário 8.2.5 para o cenário 8.2.1, respetivamente, dos valores das temperaturas operativas do quarto e do desvão, bem como das temperaturas superficiais da cobertura e da esteira.

Quadro 8.33

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.5 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.5 face ao 8.2.1)				
Local	Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Desvão de cobertura	+0,1	+1,4	-0,8
	Quarto	-0,2	+1,2	-1,4

Quadro 8.34

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.5 FACE AO 8.2.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.5 face ao 8.2.1)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,3	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+0,4	-0,2
	Face superior da esteira	+0,1	+2,4	-1,7
	Face inferior da esteira	-0,3	+2,3	-2,3

Verifica-se que, com a existência de esteira leve, face a esteira pesada, em termos de temperaturas médias, praticamente não se vislumbraram diferenças entre os dois cenários. Em relação às temperaturas máximas, com a esteira leve, existe um aumento de 1,4°C no desvão de cobertura e 1,2°C no quarto e quanto às temperaturas mínimas existe uma diminuição de 0,8°C no desvão de cobertura e de 1,4°C no quarto, sendo que deste modo, com a aplicação da esteira leve, existe um aumento da amplitude térmica tanto no desvão como no quarto.

Em relação às temperaturas médias das superfícies da cobertura e da esteira, praticamente se mantêm constantes nos dois cenários. No respeitante à temperatura máxima e mínima no teto do quarto, verifica-se que com a esteira leve a primeira é maior 2,3°C e a segunda é menor no mesmo valor.

No respeitante aos fluxos de calor médios entre a esteira e o quarto, verifica-se que a esteira leve implicou fluxos de calor à radiação, convecção e condução, superiores respetivamente em 27,3%, 28,6% e 27,5%.

8.2.6 EDIFÍCIO COM ITRBE POR CIMA DA ESTEIRA LEVE

8.2.6.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

Neste cenário, a única diferença face ao 8.2.5, é que se colocou por cima da esteira leve o ITRBE constituído por 5 mm de espessura de PEF revestido nas duas faces com folhas de alumínio com emissividade igual a 0,06, supondo-se neste cenário que o ITRBE foi recentemente aplicado e que por isso não apresenta pó e outras sujidades na sua superfície.

No Quadro 8.35 apresentam-se as variações deste cenário de aplicação de ITRBE na esteira leve face ao cenário inicial 8.2.5 de sem qualquer tipo de isolamento, dos valores das temperaturas operativas médias, máximas e mínimas obtidas nas cinco localidades e nos períodos de máxima temperatura exterior.

Quadro 8.35

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.6 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.6 face ao 8.2.5)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	+0,4	+1,7	-0,5
	Quarto	-0,4	-2,0	+0,8
Maia	Desvão de cobertura	+0,3	+1,5	-0,5
	Quarto	-0,3	-1,9	+0,7
Beja	Desvão de cobertura	+0,3	+1,7	-0,6
	Quarto	-0,4	-2,1	+0,9
Petroлина	Desvão de cobertura	+0,4	+2,1	-0,4
	Quarto	-0,3	-2,5	+0,7
Dili	Desvão de cobertura	+0,6	+1,7	+0,2
	Quarto	-0,6	-2,0	0,0

Pela análise do Quadro anterior é de realçar que em todas as localidades as temperaturas operativas médias e sobretudo as máximas do desvão aumentaram com a aplicação de ITRBE na esteira, sendo que nas primeiras existe um aumento máximo de 0,6°C em Dili e nas segundas o aumento máximo foi de 2,1°C em Petroлина. Quanto à temperatura operativa mínima no desvão, verifica-se que a aplicação de ITRBE na esteira provoca o seu abaixamento, com exceção em Dili que aumenta 0,2°C, sendo que o maior deles ocorreu em Beja no valor de 0,6°C. Já quanto às temperaturas operativas do quarto, verifica-se que os valores médios diminuíram em todas as localidades, sendo que o maior abaixamento ocorreu em Dili no valor de 0,6°C. Quanto aos valores máximos das temperaturas operativas no quarto, verifica-se que com ITRBE sobre a esteira leve, existiu, em todas as localidades, um abaixamento que não é negligenciável de cerca de 2°C, sendo que o decréscimo máximo ocorreu em Petroлина no valor de 2,5°C. Quanto à temperatura mínima no quarto e com a aplicação de ITRBE na esteira, aquela, com exceção de Dili em que não ocorreu qualquer alteração, aumentou um pouco, sendo a variação máxima ocorrida de 0,9°C em Beja.

Comparando esta situação com a existência de uma esteira pesada, com e sem ITRBE sobre a mesma, respetivamente os cenários 8.2.2 e 8.2.1, verifica-se que com a esteira leve, a aplicação de ITRBE implica variações de temperaturas médias face à situação sem ITRBE muito similares à situação de esteira pesada.

É relevante referir que em relação às variações das temperaturas máximas, verifica-se que, no que concerne ao desvão, o uso de ITRBE sobre a esteira leve provoca um menor aumento de temperatura do que o uso de ITRBE sobre esteira pesada e no que concerne ao quarto, o ITRBE sobre esteira leve provoca uma diminuição de temperatura de cerca de 2°C, enquanto que ao colocar ITRBE sobre esteira pesada praticamente não existe variação, sendo que em alguns locais sobe e noutros desce ligeiramente.

No Quadro 8.36 apresentam-se as variações deste cenário de aplicação de ITRBE na esteira face ao cenário 8.2.5 de sem qualquer tipo de isolamento, das temperaturas médias, máximas e mínimas das superfícies da cobertura e da esteira, obtidas nas cinco localidades e nos períodos considerados.

Quadro 8.36

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.6 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR.

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.6 face ao 8.2.5)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,5	-0,1
	Face interior da cobertura oeste	+0,2	+0,7	-0,2
	Face superior da esteira	-0,5	-2,1	+0,7
	Face inferior da esteira	-0,6	-3,4	+1,2
Maia	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,4	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+0,6	-0,2
	Face superior da esteira	-0,4	-2,1	+0,7
	Face inferior da esteira	-0,4	-3,2	+1,2
Beja	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,6	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+0,6	-0,3
	Face superior da esteira	-0,4	-2,3	+0,9
	Face inferior da esteira	-0,6	-3,7	+1,6
Petrolinea	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,6	-0,1
	Face interior da cobertura oeste	+0,2	+0,9	-0,2
	Face superior da esteira	-0,4	-2,6	+0,7
	Face inferior da esteira	-0,5	-4,2	+1,3
Dili	Face exterior da cobertura oeste	+0,2	+0,5	+0,0
	Face interior da cobertura oeste	+0,3	+0,7	0,0
	Face superior da esteira	-0,6	-2,2	0,0
	Face inferior da esteira	-0,9	-3,4	+0,1

Da análise dos valores do Quadro anterior, realça-se que com a aplicação de ITRBE na esteira leve, as temperaturas máximas aumentaram na cobertura tanto na face exterior como na interior, evidenciando-se o caso de Petrolina com um aumento de 0,6°C na superfície exterior das telhas e de 0,9°C na sua superfície interior. Em relação à esteira leve, evidencia-se a diminuição em todas as localidades, da temperatura, média e máxima, tanto da face superior como da face inferior (teto do quarto), chegando-se nesta a valores de abaixamento da temperatura máxima de 4,2°C em Petrolina e da temperatura média de 0,9°C em Dili. Quanto à temperatura mínima ocorrida no teto do quarto, verifica-se que em todas as localidades o seu valor aumentou com o uso de ITRBE sobre a esteira leve, atingindo-se o maior diferencial em Beja com um valor de 1,6°C. Realizando uma comparação com o que ocorreu com a esteira pesada, pode-se concluir que no respeitante às temperaturas médias pouca diferença existe. Já no que concerne às temperaturas máximas no teto do quarto, verifica-se que com ITRBE sobre a esteira leve, a diminuição é substancialmente mais relevante do que no caso de se usar ITRBE na esteira pesada e quanto às temperaturas mínimas no teto do quarto, o aumento é mais relevante com ITRBE sobre a esteira leve do que sobre a esteira pesada.

Por fim e no respeitante aos fluxos de calor máximos descendentes devidos à radiação, convecção e condução, verifica-se que, com a aplicação do ITRBE sobre a esteira leve, as reduções são apreciáveis atingindo-se respetivamente na Maia decréscimos máximos de 46,0% , 47,1 % e 46,5%, valores algo mais elevados do que os diferenciais homólogos na situação de existência de esteira pesada, em que na Maia se atingiram reduções de respetivamente de 40,5%, 35,4% e 39%.

8.2.6.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

De seguida e de forma a se analisar as consequências da colocação de ITRBE numa esteira leve, mas agora numa situação de temperaturas exteriores mais baixas no ano, realizou-se novamente a simulação para Montalegre e para o período anual de menores temperaturas, de forma a comparar esta situação com a anterior já apresentada em 8.2.5, de inexistência de ITRBE.

Nos Quadros 8.37 e 8.38 apresentam-se as variações deste cenário 8.2.6 para o cenário 8.2.5, respetivamente, dos valores das temperaturas operativas do quarto e do desvão, bem como das temperaturas superficiais da cobertura e da esteira.

Quadro 8.37

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.6 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.6 face ao 8.2.5)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	-0,3	+0,3	-0,7
	Quarto	+0,3	-0,2	+0,9

Quadro 8.38

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.6 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.6 face ao 8.2.5)				
Local	Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	0,0	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	+0,1	-0,3
	Face superior da esteira	+0,2	-0,4	+0,8
	Face inferior da esteira	+0,5	-0,4	+1,4

Verifica-se que a existência de ITRBE sobre a esteira leve, face a não ter o isolamento, provoca em termos médios uma diminuição de 0,3 °C da temperatura do desvão e um aumento de 0,3°C da temperatura do quarto, podendo, assim, dizer-se que em termos médios praticamente não existem diferenças entre os dois cenários. Em relação às temperaturas máximas, com o ITRBE na esteira leve, existe um aumento de 0,3°C no desvão de cobertura e uma diminuição de 0,2°C no quarto e quanto às temperaturas mínimas existe uma diminuição de 0,7°C no desvão de cobertura e um aumento de 0,9°C no quarto.

Importa referir que as temperaturas médias das superfícies da cobertura e esteira, praticamente se mantêm constantes nos dois cenários. No respeitante à temperatura mínima no teto do quarto, verifica-se que com o ITRBE na esteira leve, aquela é maior em 1,4°C do que na situação sem ITRBE.

No respeitante aos fluxos de calor da esteira para o quarto verifica-se que em termos médios com a aplicação de ITRBE na esteira, existiu uma diminuição do fluxo de radiação em 35%, do fluxo de convecção em 36,6% e do fluxo de condução em 35,1%, sendo que todos estes fluxos médios são ascendentes.

É pois evidente, tanto em termos de temperaturas como de fluxos de calor, e tendo em conta os cenários relativos a Montalegre, de que o impacto do ITRBE na esteira leve é maior no período de maiores temperaturas do ar exterior do que no de menores.

8.2.7 EDIFÍCIO COM ITRBE POR CIMA DA ESTEIRA LEVE E COM ACUMULAÇÃO DE PÓ

De forma a verificar-se a influência do pó no comportamento dos ITRBEs sobre a esteira, considerou-se o cenário, para Petrolina (local dos estudados onde se atinge temperaturas mais elevadas) e Beja (local dos estudados de Portugal onde se atinge temperaturas mais elevadas), de esteira leve com ITRBE com pó acumulado durante um período de 4 anos, sendo que o valor da emissividade considerado para esta superfície foi de 0,38, valor obtido através de medição de acordo com o abordado no Capítulo VII. Pela assunção de que a emissividade é numericamente igual à absorptância, foi considerado o coeficiente de absorção igual a 0,38.

Nos Quadros 8.39 e 8.40 apresentam-se as variações deste cenário de aplicação de ITRBE na esteira leve com pó, face ao cenário 8.2.6, sem pó, respetivamente dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão, bem como das temperaturas das superfícies da cobertura e esteira.

Quadro 8.39

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.7 FACE AO 8.2.6, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.7 face ao 8.2.6)				
Local	Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Beja	Desvão de cobertura	-0,1	-0,5	+0,2
	Quarto	+0,2	+0,8	-0,3
Petrolina	Desvão de cobertura	-0,1	-0,6	+0,1
	Quarto	+0,2	+1,0	-0,2

Quadro 8.40

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.7 FACE AO 8.2.6, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.7 face ao 8.2.6)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Beja	Face exterior da cobertura oeste	0,0	-0,2	+0,1
	Face interior da cobertura oeste	0,0	-0,2	+0,1
	Face superior da esteira	+0,5	+2,4	-0,9
	Face inferior da esteira	+0,3	+1,5	-0,5
Petrolina	Face exterior da cobertura oeste	0,0	-0,2	0,0
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	-0,3	+0,1
	Face superior da esteira	+0,4	+2,7	-0,7
	Face inferior da esteira	+0,3	+1,7	-0,5

Pela análise do Quadro 8.39 é de realçar que as temperaturas operativas médias e sobretudo as máximas do desvão diminuíram com a deposição de pó, sendo que nas segundas o decréscimo máximo foi de 0,6°C em Petrolina. Já quanto às temperaturas operativas do quarto, verifica-se que os valores médios aumentaram muito pouco. Quanto aos valores máximos das temperaturas operativas no quarto, verificou-se que o pó provocou um acréscimo de 0,8°C e 1°C respetivamente em Beja e Petrolina. Da análise dos valores do Quadro 8.40, realça-se que a deposição do pó no ITRBE, implicou que a temperatura média no teto do quarto aumentasse em 0,3°C nas duas localidades e que a temperatura máxima aumentasse em 1,5°C em Beja e 1,7°C em Petrolina. Por fim, e no respeitante aos fluxos de calor médios, todos descendentes, devidos à radiação, convecção e condução, verifica-se que, com a deposição de pó no ITRBE sobre a esteira leve, os aumentos dos valores são apreciáveis, atingindo-se em Beja respetivamente acréscimos de 47,0%, 36,9% e 45,1%, sendo deste modo evidente as consequências negativas da deposição do pó neste tipo de isolamentos.

8.2.8 EDIFÍCIO INTEGRANDO ESTEIRA LEVE E COM ITRBE POR BAIXO DAS VERTENTES DA COBERTURA

8.2.8.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

Neste cenário, a única diferença face ao 8.2.5, é que se colocou por baixo das vertentes em telha cerâmica, apoiada em estrutura de madeira, um ITRBE constituído por 5 mm de espessura de PEF revestido nas duas faces com folhas de alumínio com emissividade igual a

0,06, supondo-se que o ITRBE foi recentemente aplicado e que por isso não apresenta pó e outras sujidades. Entre o ITRBE e a telha cerâmica existe uma caixa de ar de 4 cm, que igualmente, tal e qual o desvão de cobertura, se considera ventilada no valor de 3 RPH. No Quadro 8.41, apresentam-se as variações deste cenário, de aplicação de ITRBE sob a vertente da cobertura, face ao cenário 8.2.5, correspondente à não utilização de qualquer tipo de isolamento na cobertura, dos valores das temperaturas operativas médias, máximas e mínimas obtidas nas cinco localidades e nos períodos de máxima temperatura exterior.

Quadro 8.41
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.8 face ao 8.2.5)				
Local	Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Desvão de cobertura	-2,0	-8,5	+2,4
	Quarto	-1,0	-3,5	+1,0
Maia	Desvão de cobertura	-1,4	-8,2	+2,5
	Quarto	-0,7	-3,3	+1,0
Beja	Desvão de cobertura	-1,9	-9,2	+3,0
	Quarto	-0,9	-3,7	+1,1
Petroлина	Desvão de cobertura	-1,5	-10,2	+2,5
	Quarto	-0,8	-4,2	+0,9
Dili	Desvão de cobertura	-2,3	-8,3	+0,1
	Quarto	-1,1	-3,3	-0,1

Pela análise do Quadro anterior é de realçar que em todas as localidades as temperaturas operativas médias e sobretudo as máximas do desvão diminuem com a aplicação de ITRBE sob as telhas (situação oposta à aplicação de ITRBE na esteira, em que as temperaturas no desvão aumentaram face ao cenário 8.2.5), sendo que nas primeiras existe uma diminuição máxima de 2,3°C em Dili e nas segundas o decréscimo máximo foi de 10,2°C em Petroлина. Quanto à temperatura operativa mínima no desvão, verifica-se que com a aplicação de ITRBE sob as telhas, existe o seu aumento em relação ao cenário 8.2.5, sendo que o maior deles ocorreu em Beja no valor de 3,0°C, ou seja com ITRBE sob as telhas as temperaturas do desvão durante a noite não diminuem tanto. Já quanto às temperaturas operativas do quarto, verifica-se que os valores médios diminuíram em todas as localidades, sendo que o maior abaixamento ocorreu em Dili no valor de 1,1°C (recorda-se que o máximo abaixamento que a

aplicação de ITRBE na esteira provocou foi de 0,6°C em Dili). Quanto aos valores máximos das temperaturas operativas no quarto, as mesmas diminuíram em todas as localidades, sendo o abaixamento máximo em Petrolina no valor de 4,2°C (recorda-se que o máximo abaixamento que a aplicação de ITRBE na esteira provocou foi de 2,5°C também em Petrolina). Quanto à temperatura mínima no quarto esta diminui, sendo que o maior decréscimo foi de 1,1°C em Beja. Comparando estes resultados, em termos médios, com a situação de colocar ITRBE sobre a esteira (cenário 8.2.6), verifica-se que no período de temperaturas exteriores mais elevadas é mais benéfico usar o ITRBE sob as vertentes do que sobre a esteira, isto mesmo sem incluir a maior problemática com a acumulação de pó que a segunda solução provoca. No Quadro 8.42 apresentam-se as variações deste cenário de aplicação de ITRBE sob as telhas, face ao cenário 8.2.5, sem qualquer tipo de isolamento, das temperaturas médias, máximas e mínimas das superfícies da cobertura e da esteira, obtidas nas cinco localidades e nos períodos considerados.

Quadro 8.42

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.8 face ao 8.2.5)				
Local	Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	+0,2	+1,3	-0,4
	Face interior da cobertura oeste	+0,4	+1,7	-0,5
	Face superior da esteira	-1,7	-6,8	+1,9
	Face inferior da esteira	-1,5	-5,9	+1,6
Maia	Face exterior da cobertura oeste	+0,2	+1,2	-0,4
	Face interior da cobertura oeste	+0,3	+1,6	-0,6
	Face superior da esteira	-1,2	-6,6	+2,0
	Face inferior da esteira	-1,1	-5,6	+1,7
Beja	Face exterior da cobertura oeste	+0,2	+1,4	-0,5
	Face interior da cobertura oeste	+0,3	+1,7	-0,7
	Face superior da esteira	-1,5	-7,4	+2,5
	Face inferior da esteira	-1,4	-6,3	+2,1
Petrolina	Face exterior da cobertura oeste	+0,2	+1,6	-0,4
	Face interior da cobertura oeste	+0,3	+2,2	-0,5
	Face superior da esteira	-1,3	-8,2	+1,9
	Face inferior da esteira	-1,1	-7,0	+1,6
Dili	Face exterior da cobertura oeste	+0,3	+1,3	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,4	+1,6	-0,2
	Face superior da esteira	-2,0	-6,7	0,0
	Face inferior da esteira	-1,7	-5,7	0,0

Da análise dos valores do Quadro anterior realça-se que com a aplicação de ITRBE sob as telhas de cobertura, as temperaturas máximas aumentam na cobertura tanto na face exterior como na interior, evidenciando-se o caso de Petrolina com um aumento de 1,6°C na superfície exterior das telhas (note-se que no cenário ITRBE sobre a esteira este aumento foi de somente 1,1°C) e de 2,9°C na sua superfície interior (note-se que no cenário ITRBE sobre a esteira este aumento foi de somente 0,6°C). Em relação à esteira leve, evidencia-se a diminuição em todas as localidades, da temperatura, média e máxima, tanto da face superior como da face inferior (teto do quarto), chegando-se, neste último, a valores de abaixamento da temperatura máxima de 7,0°C em Petrolina (note-se que no cenário ITRBE sobre a esteira este decréscimo foi de somente 4,2°C) e da temperatura média de 1,7°C em Dili (note-se que no cenário ITRBE sobre a esteira este decréscimo foi de somente 0,9°C). Quanto à temperatura mínima ocorrida no teto do quarto, verifica-se que em todas as localidades, com exceção de Dili (que não sofreu qualquer variação) o seu valor aumentou com a aplicação de ITRBE sob as telhas da cobertura, sendo o diferencial mais elevado de 2,1°C atingido em Beja. Já no respeitante aos fluxos de calor, através da totalidade da esteira, e igualmente face ao cenário 8.2.5, apresentam-se no Quadro 8.43 as variações dos correspondentes valores.

Quadro 8.43

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Esteira -> Quarto (cenário 8.2.8 face ao 8.2.5)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.2.8 (W)	8.2.5 (W)	ΔW (%)	8.2.8 (W)	8.2.5 (W)	ΔW (%)	8.2.8 (W)	8.2.5 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	-9,5	45,1	*	85,7	350,8	-75,6	-120,7	-140,1	-13,8
	Convecção	-1,1	27,4	*	41,3	178,7	-76,9	-51,9	-64,5	-19,5
	Condução	-12,8	70,2	*	126,7	535,5	-76,3	-161,0	-212,1	-24,1
Maia	Radiação	-11,6	27,0	*	81,5	342,5	-76,2	-108,2	-135,8	-20,3
	Convecção	-3,1	17,1	*	38,2	173,4	-78,0	-46,8	-63,9	-26,8
	Condução	-16,5	42,3	*	120,6	523,1	-76,9	-143,3	-205,3	-30,2
Beja	Radiação	-5,4	45,1	*	108,0	400,0	-73,0	-119,2	-170,8	-30,2
	Convecção	0,5	27,0	-98,1	49,9	201,0	-75,2	-50,9	-79,5	-36,0
	Condução	-6,7	70,3	*	160,0	612,2	-73,9	-157,1	-258,6	-39,2
Petrolina	Radiação	-1,0	39,0	*	114,6	442,0	-74,1	-84,8	-145,7	-41,8
	Convecção	3,0	24,0	-87,5	54,5	224,5	-75,7	-35,4	-66,3	-46,6
	Condução	0,1	60,8	-99,8	171,6	678,5	-74,7	-104,1	-220,1	-52,7
Dili	Radiação	19,4	82,1	-76,4	95,5	355,2	-73,1	-50,5	-46,5	+8,6
	Convecção	12,8	45,6	-71,9	48,0	182,7	-73,7	-19,2	-17,4	+10,3
	Condução	31,0	126,5	-75,5	144,2	545,0	-73,5	-56,9	-71,2	-20,1

* Inversão do sentido do fluxo de calor.

Da análise do Quadro anterior, é de realçar de que no que concerne ao fluxo entre a esteira leve e o quarto, de que com a aplicação de ITRBE sob as telhas existe uma significativa diminuição desse valor em relação ao cenário de aplicação de ITRBE sobre a esteira, exemplifica-se o caso de Dili em que o fluxo de radiação médio descendente passa de uma redução de 41,0% (do cenário 8.2.6 para 8.2.5) para 76,4% (do cenário 8.2.8 para 8.2.5).

Realizando, agora, uma comparação entre a aplicação de ITRBE nas vertentes sob a telha de cobertura, tendo o edifício ora esteira leve (cenário 8.2.8), ora esteira pesada (8.2.4), apresentam-se no Quadro 8.44, as variações do primeiro cenário face ao segundo, dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão.

Quadro 8.44
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.4, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.8 face ao 8.2.4)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	-0,1	+1,4	-1,8
	Quarto	0,0	+0,3	-1,5
Maia	Desvão de cobertura	0,0	+1,8	-1,3
	Quarto	0,0	+0,7	-1,2
Beja	Desvão de cobertura	-0,2	+1,8	-2,0
	Quarto	-0,1	+1,4	-1,7
Petroлина	Desvão de cobertura	-0,5	+1,8	-1,9
	Quarto	-0,3	+1,2	-1,1
Dili	Desvão de cobertura	-0,2	+1,1	-1,0
	Quarto	+0,1	+0,5	-0,8

Pela análise do Quadro anterior, verifica-se que, em termos médios, as variações relativas aos dois cenários são pouco significativas, sendo em Petroлина que se atingem maiores desvios do cenário de esteira leve para esteira pesada, com a temperatura do quarto a ser inferior em 0,3°C e o desvão de cobertura a ser inferior em 0,5°C. Já quanto às temperaturas máximas, verifica-se que o cenário de esteira leve implica valores superiores ao cenário de esteira pesada, sendo, no conjunto, os diferenciais em Beja, os mais significativos, com um acréscimo de 1,8°C no desvão de cobertura e de 1,4°C no quarto. Em relação às temperaturas

mínimas, a situação de esteira leve implica valores inferiores à situação de esteira pesada, chegando-se em Beja a diferenciais de 2,0°C para o desvão de cobertura e de 1,8°C para o quarto. Assim, esta situação de amplitudes térmicas inferiores na situação de esteira pesada é evidente, sendo a maior inércia térmica o fator que justifica estes resultados.

No Quadro 8.45 apresentam-se as variações deste cenário 8.2.8, face ao cenário 8.2.4 das temperaturas das superfícies da cobertura, do ITRBE e da esteira.

Quadro 8.45
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.4, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.8 face ao 8.2.4)				
Local	Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	0,0	0,0	-0,1
	Face inferior do ITRBE	0,0	+0,9	-1,1
	Face superior da esteira	-0,1	+2,0	-2,5
	Face inferior da esteira	-0,1	+2,2	-2,5
Maia	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,1	0,0
	Face inferior do ITRBE	0,0	+1,1	-0,8
	Face superior da esteira	+0,1	+2,5	-1,9
	Face inferior da esteira	0,0	+2,5	-2,1
Beja	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,1	-0,1
	Face inferior do ITRBE	-0,1	+1,1	-1,2
	Face superior da esteira	-0,1	+2,6	-2,6
	Face inferior da esteira	-0,1	+2,8	-2,8
Petrolina	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,1	-0,1
	Face inferior do ITRBE	-0,3	+1,1	-1,3
	Face superior da esteira	-0,5	+2,5	-2,2
	Face inferior da esteira	-0,4	+2,8	-2,1
Dili	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,1	-0,1
	Face inferior do ITRBE	-0,1	+0,6	-0,6
	Face superior da esteira	-0,1	+1,7	-1,2
	Face inferior da esteira	+0,1	+1,9	-1,1

Pela observação do Quadro anterior verifica-se que, em termos médios, as variações entre os dois cenários são em geral pouco significativas. Já em termos das temperaturas máximas verificam-se diferenças mais substanciais, atingindo-se com a esteira leve temperaturas no

teto do quarto superiores em 2,8°C tanto em Beja como em Petrolina. De realçar que em Beja, com a esteira leve, atinge-se temperaturas mínimas inferiores em 2,8°C, relativamente ao cenário de esteira pesada. Mais uma vez, a inércia térmica justifica estas diferenças.

Por fim e no respeitante aos fluxos de calor através da totalidade da esteira, apresentam-se no Quadro 8.46, e igualmente face ao cenário de ITRBE nas vertentes sob a telha de cobertura, sendo a esteira pesada (cenário 8.2.4), as respetivas variações.

Quadro 8.46
VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.4, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Esteira -> Quarto (cenário 8.2.8 face ao 8.2.4)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.2.8 (W)	8.2.4 (W)	ΔW (%)	8.2.8 (W)	8.2.4 (W)	ΔW (%)	8.2.8 (W)	8.2.4 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	-9,5	-5,5	+72,7	85,7	63,2	+35,6	-120,7	-151,5	-20,3
	Convecção	-1,1	1,0	*	41,3	40,7	+1,5	-51,9	-71,8	-27,7
	Condução	-12,8	-6,6	+93,9	126,7	101,4	+25,0	-161,0	-228,4	-29,5
Maia	Radiação	-11,6	-11,5	+0,9	81,5	46,9	+73,8	-108,2	-148,9	-27,3
	Convecção	-3,1	-3,1	0,0	38,2	30,9	+23,6	-46,8	-73,2	-36,1
	Condução	-16,5	-16,2	+1,9	120,6	75,4	+59,9	-143,3	-226,2	-36,6
Beja	Radiação	-5,4	-0,9	+500,0	108	63,4	+70,3	-119,2	-134,1	-11,1
	Convecção	0,5	2,9	-82,8	49,9	41,8	+19,4	-50,9	-65,0	-21,7
	Condução	-6,7	0,2	*	160	102,4	+56,3	-157,1	-203,6	-22,8
Petrolina	Radiação	-1,0	17,5	*	114,6	72,6	+57,9	-84,8	-147,3	-42,4
	Convecção	3,0	12,6	-76,2	54,5	46,7	+16,7	-35,4	-71,0	-50,1
	Condução	0,1	28,6	-99,7	171,6	116,5	+47,3	-104,1	-222,6	-53,2
Dili	Radiação	19,4	16,2	+19,8	95,5	63,5	+50,4	-50,5	-113,4	-55,5
	Convecção	12,8	11,1	+15,3	48,0	39,2	+22,4	-19,2	-54,7	-64,9
	Condução	3,01	26,3	+17,9	144,2	101,1	+42,6	-56,9	-171,0	-66,7

* Inversão do sentido do fluxo de calor.

Da análise do Quadro anterior, é de realçar de que no que concerne ao fluxo de calor entre a esteira e o quarto, de que a situação de existência de esteira leve em termos médios e para o caso da radiação, implica maiores fluxos ascendentes no caso das localidades Portuguesas (chegando a um aumento de 500% em Beja); a uma passagem de fluxo descendente para ascendente, no caso de Petrolina e de um aumento do fluxo descendente, em cerca de 20% em Dili. Para o caso da convecção, verifica-se que para o mesmo fluxo de calor os valores são

muito próximos em Montalegre e Maia, sendo que em Beja a esteira leve implicou uma diminuição de 82,8 % do fluxo descendente, em Petrolina uma diminuição de 76,2% e em Dili um aumento de 15,3%. Já quanto à condução, verifica-se que com a utilização da esteira leve, em Montalegre e Maia existiu um aumento do fluxo ascendente (93,9% em Montalegre) e em Dili um aumento do fluxo descendente (17,9%) e em Petrolina existiu uma diminuição de 99,7% do fluxo descendente.

No respeitante aos fluxos de calor máximos da esteira para o quarto, verifica-se que a esteira leve implicou para todas as localidades um aumento de fluxo, sendo que o diferencial mais relevante ocorreu na Maia, em que para a radiação, atingiu-se o valor de 73,8%, para a convecção 23,6% e para a condução 59,9%.

Verifica-se, ainda, que, como seria de esperar, a diferença entre o fluxo por condução da esteira para o quarto é maioritariamente superior no caso da esteira pesada do que no caso da esteira leve. Já quanto aos fluxos por radiação verifica-se que em muitos dos casos tal já não acontece, como é o caso do fluxo máximo descendente em que para todas as localidades o diferencial entre o fluxo da esteira para o quarto é superior para o caso da esteira leve.

8.2.8.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

De seguida e de forma a se analisar as consequências da colocação de ITRBE sob as telhas das vertentes da cobertura, mas agora numa situação de temperaturas exteriores mais baixas no ano, realizou-se novamente a simulação para Montalegre e para o período anual de menores temperaturas, de forma a comparar esta situação com a anterior já apresentada em 8.2.5, de inexistência de ITRBE.

Nos Quadros 8.47 e 8.48, apresentam-se as variações deste cenário de esteira leve com ITRBE sob as telhas das vertentes, face ao cenário inicial 8.2.5 de sem ITRBE, respetivamente dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão de cobertura, bem como dos valores das temperaturas das superfícies da cobertura e da esteira.

Quadro 8.47

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.8 face ao 8.2.5)				
Local	Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Desvão de cobertura	+0,9	-1,9	+2,8
	Quarto	+0,5	-0,5	+1,3

Quadro 8.48

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.8 face ao 8.2.5)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	+0,3	-0,4
	Face interior da cobertura oeste	-0,2	+0,5	-0,6
	Face superior da esteira	+0,8	-1,4	+2,3
	Face inferior da esteira	+0,7	-1,1	+2,1

Verifica-se que a existência de ITRBE sob as telhas das vertentes, face a não ter o isolamento, provoca em termos médios um aumento de 0,9 °C da temperatura do desvão e um aumento de 0,5°C da temperatura do quarto. Em relação às temperaturas máximas, com o ITRBE sob as vertentes, existe uma diminuição de 1,9°C no desvão de cobertura e uma diminuição de 0,5°C no quarto e quanto às temperaturas mínimas existe um aumento de 2,8°C no desvão de cobertura e um aumento de 1,3°C no quarto. Verifica-se, também, que com a colocação de ITRBE sob as vertentes, a temperatura média do teto do quarto (face inferior da esteira) aumentou 0,7°C, a máxima diminuiu 1,1°C e a mínima aumentou 2,1°C. Comparando estes resultados, em termos médios, com a situação de colocar ITRBE sobre a esteira (cenário 8.2.6) verificou-se que no período de temperaturas exteriores mais baixas é igualmente mais benéfico usar o ITRBE sob as vertentes do que sobre a esteira, isto mesmo sem incluir a maior problemática com a acumulação de pó da segunda solução.

Por fim e no respeitante aos fluxos de calor, através da totalidade da esteira, devidos à radiação, convecção e condução, face ao cenário de sem isolamento ITRBE e com a esteira

leve (cenário 8.2.5), apresentam-se, no Quadros 8.49 as variações em percentagem dos correspondentes valores.

Quadro 8.49

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.5, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Esteira -> Quarto (cenário 8.2.8 face ao 8.2.5)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.2.8 (W)	8.2.5 (W)	ΔW (%)	8.2.8 (W)	8.2.5 (W)	ΔW (%)	8.2.8 (W)	8.2.5 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	-30,0	-55,5	-45,9	1,6	65,4	-93,3	-106,4	-152,0	-30,0
	Convecção	-14,6	-27,9	-47,7	-	32,5	-	-48,6	-72,6	-33,1
	Condução	-45,5	-84,4	-46,1	-0,7	106,6	-100,7	-143,0	-224,8	-36,4

No respeitante aos fluxos de calor da esteira para o quarto, verifica-se que em termos médios com a aplicação de ITRBE sob as vertentes da cobertura, existiu uma diminuição do fluxo de radiação em 45,9 %, do fluxo de convecção em 47,7% e do fluxo de condução em 46,1%, sendo que todos estes fluxos médios são ascendentes. Também, neste desiderato, se verifica que esta solução dá melhores resultados do que a colocação de ITRBE sobre a esteira leve (cenário 8.2.6), sendo que as diminuições de fluxo foram sensivelmente inferiores em aproximadamente 10%.

Realizando, agora, uma comparação entre a aplicação de ITRBE nas vertentes sob a telha de cobertura, tendo o edifício ora esteira leve (cenário 8.2.8), ora esteira pesada (8.2.4), apresentam-se nos Quadros 8.50 e 8.51, as variações deste cenário 8.2.8 face ao inicial 8.2.5 de sem ITRBE, respetivamente dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão de cobertura, bem como dos valores das temperaturas das superfícies da cobertura e da esteira.

Quadro 8.50

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.4, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.8 face ao 8.2.4)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	+0,1	+0,9	-0,7
	Quarto	0,0	+0,2	-0,7

Quadro 8.51

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.4, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.8 face ao 8.2.4)				
Local	Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	0,0	0,0	0,0
	Face inferior do ITRBE	+0,1	+0,6	-0,4
	Face superior da esteira	+0,1	+1,3	-1,0
	Face inferior da esteira	-0,1	+1,1	-1,1

Verifica-se que, em termos de temperaturas operativas e superficiais médias, as variações relativas aos dois cenários são desprezáveis. Já quanto às temperaturas máximas, verifica-se que o cenário de esteira leve implica valores superiores ao cenário de esteira pesada, com um acréscimo de 0,9°C no desvão de cobertura e de 0,2°C no quarto. Em relação às temperaturas mínimas a situação de esteira leve implica valores inferiores à situação de esteira pesada, chegando-se a diferenciais de 0,7°C para o desvão de cobertura e de 0,7°C para o quarto. Já para as temperaturas superficiais máximas, verificam-se diferenças maiores, atingindo-se com a esteira leve uma temperatura no teto do quarto superior em 1,1°C. De realçar que, com a esteira leve, atinge-se temperaturas mínimas inferiores em 1,1°C, relativamente ao cenário de esteira pesada. Assim, esta situação de amplitudes térmicas inferiores na situação de esteira pesada é evidente, sendo a maior inércia térmica o fator que justifica estes resultados.

Por fim e no respeitante aos fluxos de calor do cenário 8.2.8, e igualmente face ao cenário de ITRBE nas vertentes sob a telha de cobertura, sendo a esteira pesada (cenário 8.2.4), apresentam-se, no Quadro 8.52 as variações em percentagem dos correspondentes valores.

Quadro 8.52

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.8 FACE AO 8.2.4, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Esteira -> Quarto (cenário 8.2.8 face ao 8.2.4)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.2.8 (W)	8.2.4 (W)	ΔW (%)	8.2.8 (W)	8.2.4 (W)	ΔW (%)	8.2.8 (W)	8.2.4 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	-30,0	-24,9	+20,5	1,6	4,3	-62,8	-106,4	-121,8	-12,6
	Convecção	-14,6	-11,9	+22,7	-1,2	6,1	*	-48,6	-59,6	-18,5
	Condução	-45,5	-37,7	+20,7	-0,7	8,9	*	-143	-184,3	-22,4

* Inversão do sentido do fluxo de calor.

Pela análise do Quadro anterior, verifica-se que em termos médios, a existência da esteira leve com a aplicação de ITRBE sob as vertentes da cobertura, implicou um aumento dos fluxos de calor na ordem dos 20%, sendo que todos estes fluxos médios são ascendentes.

8.2.9 EDIFÍCIO COM LÃ DE ROCHA DE 4 CM DE ESPESSURA POR CIMA DA ESTEIRA LEVE

Neste cenário colocou-se lã de rocha, de espessura igual a 4 cm, na face superior da esteira leve, e não se aplicou qualquer ITRBE, sendo que o objetivo principal é comparar o comportamento desta solução com a do cenário 8.2.8, ou seja com a aplicação de ITRBE sob as vertentes da cobertura e igualmente com a existência de esteira leve.

8.2.9.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

Nos Quadros 8.53 e 8.54, apresentam-se as variações deste cenário face ao 8.2.8, respetivamente dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão de cobertura, bem como das temperaturas superficiais da cobertura e da esteira.

Quadro 8.53
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.9 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.9 face ao 8.2.8)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	+2,6	+11,3	-3,2
	Quarto	+0,5	+0,9	+0,2
Maia	Desvão de cobertura	+1,8	+10,8	-3,4
	Quarto	+0,4	+0,8	+0,1
Beja	Desvão de cobertura	+2,5	+12,1	-4,1
	Quarto	+0,5	+0,8	+0,2
Petrolina	Desvão de cobertura	+2,1	+13,8	-3,3
	Quarto	+0,4	+0,9	+0,2
Dili	Desvão de cobertura	+3,3	+11,2	+0,1
	Quarto	+0,3	+0,6	+0,2

Quadro 8.54

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.9 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.9 face ao 8.2.8)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	-0,6	+0,2
	Face interior da cobertura oeste	-0,2	-0,8	+0,3
	Face superior da esteira	+2,5	+11,7	-3,5
	Face inferior da esteira	+0,9	+1,4	+0,3
Maia	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	-0,7	+0,2
	Face interior da cobertura oeste	-0,2	-0,9	+0,3
	Face superior da esteira	+1,7	+11,2	-3,7
	Face inferior da esteira	+0,7	+1,3	+0,2
Beja	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	-0,7	+0,3
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	-0,9	+0,3
	Face superior da esteira	+2,4	+12,6	-4,6
	Face inferior da esteira	+0,7	+1,2	+0,3
Petroliana	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	-0,8	+0,2
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	-1,1	+0,3
	Face superior da esteira	+2,0	+14,3	-3,6
	Face inferior da esteira	+0,5	+1,3	+0,4
Dili	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	-0,6	+0,2
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	-0,8	+0,2
	Face superior da esteira	+3,3	+11,7	+0,0
	Face inferior da esteira	+0,5	+1,1	+0,1

Pela análise dos Quadros anteriores é de realçar, que em todas as localidades, as temperaturas operativas médias e sobretudo as máximas do desvão são mais baixas com a aplicação de ITRBE sob as telhas do que com a colocação dos 4 cm de lã de rocha sobre a esteira leve, sendo que nas primeiras a diminuição mais significativa é de 3,3°C em Dili e nas segundas o decréscimo mais significativo foi de 13,8°C em Petroliana. Quanto à temperatura operativa mínima no desvão, verifica-se que com a aplicação de ITRBE sob as telhas, os valores das temperaturas do desvão durante a noite não diminuem tanto como no cenário 8.2.9. Já quanto às temperaturas operativas do quarto, verifica-se que os valores médios diminuíram em todas as localidades com a aplicação de ITRBE sob as telhas de cobertura face à colocação de mantas de 4 cm de espessura de lã de rocha sobre a esteira, sendo que o maior diferencial ocorreu em Montalegre e Beja no valor de 0,5°C. Quanto aos valores máximos das temperaturas operativas no quarto, as mesmas diminuíram igualmente, do cenário 8.2.9 para 8.2.8, sendo o abaixamento máximo ocorrido em Montalegre e Petroliana no valor de 0,9°C.

No respeitante às temperaturas médias e máximas tanto na face exterior como na interior da cobertura existiu uma diminuição com a aplicação da lã de rocha, sendo assim de concluir que no caso de se aplicar ITRBE sob as telhas de cobertura, a superfície exterior destas é mais quente. Em relação à esteira leve, evidencia-se que o cenário 8.2.9 face ao 8.2.8, provoca um aumento em todas as localidades, da temperatura, média e máxima, tanto da face superior como da face inferior (teto do quarto), chegando-se, em Petrolina, a valores de incremento da temperatura máxima da superfície superior de 14,3°C e em Montalegre a valores de incremento da temperatura máxima da superfície inferior (teto do quarto) de 1,4°C. Quanto à temperatura mínima ocorrida no teto do quarto, verifica-se que em todas as localidades, o seu valor aumentou um pouco com a aplicação de lã de rocha sobre a esteira leve face à aplicação de ITRBE sob as telhas de cobertura. Já em relação à temperatura mínima na face superior da esteira verifica-se que o uso de ITRBE sob as telhas provocou valores mais elevados face ao cenário 8.2.9, sendo o diferencial mais elevado atingido em Beja com o valor de 4,6°C.

Sobre os fluxos de calor, através da totalidade da esteira, e igualmente do cenário 8.2.9 face ao 8.2.8, apresentam-se, no Quadro 8.55, as variações dos correspondentes valores.

Quadro 8.55

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.9 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Esteira -> Quarto (cenário 8.2.9 face ao 8.2.8)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.2.9 (W)	8.2.8 (W)	ΔW (%)	8.2.9 (W)	8.2.8 (W)	ΔW (%)	8.2.9 (W)	8.2.8 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	21,0	-9,5	*	137,4	85,7	+60,3	-91,2	-120,7	-24,4
	Convecção	14,9	-1,1	*	68,2	41,3	+65,1	-35,8	-51,9	-31,0
	Condução	33,7	-12,8	*	205,4	126,7	+62,1	-109,6	-161	-31,9
Maia	Radiação	12,3	-11,6	*	130,0	81,5	+59,5	-82,2	-108,2	-24,0
	Convecção	9,4	-3,1	*	63,4	38,2	+66,0	-32,7	-46,8	-30,1
	Condução	20,0	-16,5	*	194,7	120,6	+61,4	-99,7	-143,3	-30,4
Beja	Radiação	20,7	-5,4	*	151,2	108	+40,0	-94,2	-119,2	-21,0
	Convecção	14,2	0,5	+2740,0	72,3	49,9	+44,9	-37,1	-50,9	-27,1
	Condução	33,1	-6,7	*	225,7	160,0	+41,1	-116,4	-157,1	-25,9
Petrolina	Radiação	19,8	-1,0	*	168,1	114,6	+46,7	-63,6	-84,8	-25,0
	Convecção	13,9	3,0	+363,3	82,4	54,5	+51,2	-23,9	-35,4	-32,5
	Condução	31,7	0,1	+31600,0	253,5	171,6	+47,7	-70,3	-104,1	-32,5
Dili	Radiação	37,2	19,4	+91,8	139,2	95,5	+45,8	-32,9	-50,5	-34,9
	Convecção	22,1	12,8	+72,7	70,7	48,0	+47,3	-9,6	-19,2	-50,0
	Condução	58,1	31,0	+87,4	210,9	144,2	+46,3	-27,3	-56,9	-52,0

* Inversão do sentido do fluxo de calor.

Da análise do Quadro anterior, é de realçar, de que no que concerne ao fluxo de calor entre a esteira leve e o quarto, de que a passagem do cenário 8.2.8 para 8.2.9, em termos médios e para as várias formas de transmissão de calor, implica, na grande parte dos casos, inversão de fluxo, nomeadamente a passagem de fluxo descendente, no caso da existência de lã de rocha sobre a esteira, para fluxo ascendente no caso de aplicação de ITRBE sob as telhas da cobertura. Existem, no entanto, casos em que tal não acontece, como é o de Dili e em todas as formas de transmissão de calor, em que para os dois cenários o fluxo médio da esteira para o quarto é sempre descendente, sendo que o que acontece é que o seu valor é substancialmente inferior (reduções entre 72,7%, na convecção, e 91,8%, na radiação) no caso do uso de ITRBE sob as telhas de cobertura do que no de aplicação de lã de rocha sobre a esteira.

No respeitante aos fluxos de calor máximos da esteira leve para o quarto, verifica-se que a aplicação de ITRBE sob as telhas de cobertura implica para todas as localidades e formas de transmissão de calor uma diminuição substancial de fluxo em relação ao uso de mantas de 4 cm de lã de rocha sobre a esteira, sendo que em geral o diferencial mais relevante ocorreu em Montalegre, em que para a radiação, atingiu-se o valor de 60,3%, para a convecção 65,1% e para a condução 62,1%.

Pela análise destes resultados, verifica-se que no período de temperaturas exteriores mais elevadas, é mais vantajoso colocar ITRBE sob as telhas de cobertura do que aplicar mantas de lã de rocha de espessura de 4 cm sobre a esteira leve.

8.2.9.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

De seguida e de forma a se comparar a colocação de ITRBE sob as telhas das vertentes da cobertura (cenário 8.2.8) com a colocação de mantas de 4 cm de espessura sobre a esteira leve (cenário 8.2.9), mas agora na situação de temperaturas exteriores mais baixas no ano, realizou-se novamente a simulação para Montalegre e para o período anual de menores temperaturas.

Nos Quadros 8.56 e 8.57, apresentam-se as variações do cenário 8.2.9, face ao cenário inicial 8.2.8, respetivamente dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão, bem como temperaturas das superfícies da cobertura e da esteira.

Quadro 8.56

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.9 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.9 face ao 8.2.8)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	-1,4	+2,3	-4,0
	Quarto	+0,1	+0,4	0,0

Quadro 8.57

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.9 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.9 face ao 8.2.8)				
Local	Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	0,0	-0,3	+0,1
	Face interior da cobertura oeste	0,0	-0,4	+0,2
	Face superior da esteira	-1,7	+2,3	-4,3
	Face inferior da esteira	+0,1	+0,6	0,0

Verifica-se que a aplicação sobre a esteira de mantas de lã de rocha de 4 cm de espessura face à introdução de ITRBE sob as telhas das vertentes da cobertura, provoca em termos médios uma diminuição de 1,4 °C da temperatura do desvão e um aumento de 0,1°C da temperatura do quarto. Em relação às temperaturas máximas, com a lã de rocha sobre a esteira, existe um aumento de 2,3°C no desvão de cobertura e um aumento de 0,4°C no quarto e quanto às temperaturas mínimas existe uma diminuição de 4,0°C no desvão de cobertura, sendo que no quarto não existe qualquer variação. Em relação à temperatura do teto do quarto, pouca variação apresenta em termos médios, sendo que em termos de valores máximos se verifica que o cenário 8.2.9 provoca um acréscimo de 0,6°C em relação ao cenário 8.2.8. Por fim, e no respeitante aos fluxos de calor, através da totalidade da esteira, e igualmente comparando o cenário 8.2.9 face ao 8.2.8, apresentam-se no Quadro 8.58 as variações em percentagem dos correspondentes valores.

Quadro 8.58

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.9 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Esteira -> Quarto (cenário 8.2.9 face ao 8.2.8)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.2.9 (W)	8.2.8 (W)	ΔW (%)	8.2.9 (W)	8.2.8 (W)	ΔW (%)	8.2.9 (W)	8.2.8 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	-24,3	-30,0	-19,0	18,9	1,6	+1081,3	-99,8	-106,4	-6,2
	Convecção	-11,6	-14,6	-20,5	7,6	-	-	-44,3	-48,6	-8,8
	Condução	-36,8	-45,5	-19,1	24,8	-	-	-127,6	-143,0	-10,8

No respeitante aos fluxos de calor da esteira para o quarto, verifica-se que em termos médios, com a aplicação de mantas de lã de rocha, com 4 cm de espessura, sobre a esteira leve, existiu, face ao cenário da aplicação de ITRBE sob as vertentes da cobertura, uma diminuição dos fluxos de calor na ordem dos 20%, sendo que todos estes fluxos médios são ascendentes. Já em termos de valores máximos descendentes verifica-se que no respeitante ao fluxo por radiação o cenário 8.2.9 apresenta um valor substancialmente maior (1081,3%) do que o cenário 8.2.8 e no respeitante aos fluxos por convecção e condução constata-se de que embora o cenário 8.2.9 apresente um máximo de fluxo descendente, no respeitante ao cenário 8.2.8 verifica-se que, no período considerado, os fluxos são sempre ascendentes. No respeitante aos valores máximos dos fluxos ascendentes é claro de que o cenário 8.3.9 implica sempre valores inferiores ao cenário 8.3.8.

Daqui se pode inferir, de que o uso de 4 cm de lã de rocha sobre a esteira, é mais benéfico, no período de mais baixas temperaturas exteriores, do que o uso de ITRBE sob as vertentes da cobertura, situação, pois, inversa, ao que se passa no período de temperaturas mais elevadas.

8.2.10 EDIFÍCIO INTEGRANDO ESTEIRA LEVE, COM ITRBE POR BAIXO DAS VERTENTES DA COBERTURA E COM ACUMULAÇÃO DE PÓ

Concluiu-se atrás que, para o período de máximas temperaturas anuais e para as condições deste estudo, a instalação de ITRBE sob as vertentes da cobertura é mais favorável do que a instalação, sobre a esteira leve, de mantas de lã de rocha com 4 cm de espessura. De forma a se constatar se esta conclusão se pode tirar mesmo tendo em conta a natural acumulação, com o tempo, de pó no ITRBE, considerou-se mais este cenário 8.2.10 em que o ITRBE é aplicado sob as vertentes da cobertura, tendo em conta os resultados das medições (ver Capítulo VII)

de emissividade das superfícies do ITRBE, após 4 anos de acumulação de pó (0,38 para superfície superior e 0,08 para a inferior).

No Quadro 8.59 apresentam-se as variações deste cenário em relação ao 8.2.9 (com 4 cm de lã de rocha aplicados na esteira), dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão.

Quadro 8.59

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.10 FACE AO 8.2.9, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.10 face ao 8.2.9)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	-2,4	-10,4	+3,0
	Quarto	-0,4	-0,6	-0,3
Maia	Desvão de cobertura	-1,6	-10,0	+3,2
	Quarto	-0,3	-0,5	-0,2
Beja	Desvão de cobertura	-2,3	-11,2	+3,9
	Quarto	-0,4	-0,5	-0,3
Petrolina	Desvão de cobertura	-1,9	-12,8	+3,1
	Quarto	-0,3	-0,5	-0,3
Dili	Desvão de cobertura	-3,0	-10,3	-0,1
	Quarto	-0,2	-0,4	-0,1

Pela análise do Quadro anterior, verifica-se que as temperaturas no quarto são mais baixas no cenário 8.2.10, permitindo, tal, concluir que mesmo com a acumulação de pó é mais benéfico para o conforto térmico do quarto (além obviamente do desvão de cobertura) o uso de ITRBE sob as vertentes da cobertura, do que o uso de mantas de lã de rocha com 4 cm de espessura sobre a esteira. Em relação à aplicação de ITRBE, sem pó, sob as vertentes da cobertura (cenário 8.2.8) verifica-se que a acumulação de pó (cenário 8.2.10) implica unicamente um diferencial de mais 0,1°C na temperatura média do quarto e de mais 0,2°C (em Dili) a 0,4°C (em Petrolina) na sua temperatura máxima.

No Quadro 8.60 apresentam-se as variações deste cenário 8.2.10, face ao cenário 8.2.9, das temperaturas médias, máximas e mínimas das superfícies da cobertura, do ITRBE e da esteira, obtidas nas cinco localidades e nos períodos considerados.

Quadro 8.60

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.10 FACE AO 8.2.9, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.10 face ao 8.2.9)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,5	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+0,7	-0,3
	Face superior da esteira	-2,3	-11,1	+3,4
	Face inferior da esteira	-0,7	-0,9	-0,4
Maia	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,6	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+0,7	-0,2
	Face superior da esteira	-1,6	-10,6	+3,6
	Face inferior da esteira	-0,6	-0,8	-0,3
Beja	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,5	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+0,7	-0,2
	Face superior da esteira	-2,3	-12,0	+4,4
	Face inferior da esteira	-0,6	-0,7	-0,5
Petrolina	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,6	-0,1
	Face interior da cobertura oeste	0,0	+0,8	-0,2
	Face superior da esteira	-1,9	-13,6	+3,5
	Face inferior da esteira	-0,4	-0,7	-0,5
Dili	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,4	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+0,6	-0,2
	Face superior da esteira	-3,1	-11,1	0,0
	Face inferior da esteira	-0,3	-0,6	-0,1

Também, pela análise deste Quadro, se pode concluir que a acumulação de pó no ITRBE sob as vertentes da cobertura continua a permitir que esta solução seja mais vantajosa para o conforto do quarto (além obviamente do desvão de cobertura) como se pode constatar pelo facto da temperatura do teto do quarto continuar a ser mais baixa na cenário 8.2.10 do que no cenário 8.2.9. Em relação à aplicação de ITRBE, sem pó, sob as vertentes da cobertura (cenário 8.2.8) verifica-se que a acumulação de pó (cenário 8.2.10) implica unicamente um diferencial de mais 0,1 a 0,2°C na temperatura média do teto do quarto e de mais 0,4°C (na Maia) a 0,6°C (em Petrolina) na sua temperatura máxima.

Em relação aos valores médios dos fluxos de calor da esteira leve para o quarto, verifica-se que a aplicação de ITRBE sob as vertentes da cobertura, mesmo com pó, continua ou a implicar a diminuição dos fluxos descendentes ou a proporcionar a passagem de fluxo descendente a ascendente. Em relação à aplicação de ITRBE, sem pó, sob as vertentes da cobertura (cenário 8.2.8) verifica-se que a acumulação de pó (cenário 8.2.10) implica, no

respeitante ao fluxo de calor médio da esteira leve para o quarto e em Dili (local em que os fluxos de calor foram, no período considerado, sempre descendentes), um acréscimo de 29,4% na radiação, de 23,4% na convecção e de 28,1% na condução. Regista-se, assim, que o pó implica diferenciais maiores no respeitante aos fluxos do que em relação às temperaturas.

8.2.11 EDIFÍCIO COM LÃ DE ROCHA DE 8 CM DE ESPESSURA POR CIMA DA ESTEIRA LEVE

Neste cenário colocou-se, tal e qual no cenário 8.2.9, mantas de lã de rocha na face superior da esteira leve, mas em vez de numa espessura igual a 4 cm, aplicou-se 8 cm. O objetivo principal é comparar o comportamento desta solução com a do cenário 8.2.8, ou seja com a aplicação de ITRBE sob as vertentes da cobertura.

No Quadro 8.61, apresentam-se as variações deste cenário face ao 8.2.8, dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão.

Quadro 8.61

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.2.11 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.2.11 face ao 8.2.8)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	+2,7	+11,9	-3,4
	Quarto	+0,4	+0,7	+0,4
Maia	Desvão de cobertura	+1,9	+11,3	-3,6
	Quarto	+0,3	+0,2	+0,4
Beja	Desvão de cobertura	+2,6	+12,8	-4,3
	Quarto	+0,3	+0,1	+0,5
Petrolinea	Desvão de cobertura	+2,2	+14,5	-3,5
	Quarto	+0,3	+0,1	+0,3
Dili	Desvão de cobertura	+3,5	+11,9	+0,1
	Quarto	+0,1	+0,1	+0,1

Pela análise do Quadro anterior e quanto às temperaturas operativas do quarto, verifica-se, em todas as localidades, que com a aplicação de ITRBE sob as telhas de cobertura os respetivos valores médios são novamente mais baixos do que os relativos à colocação de mantas de lã de rocha, agora com 8 cm de espessura, sobre a esteira, sendo que o maior diferencial ocorreu em Montalegre no valor de 0,4°C.

Quanto aos valores máximos das temperaturas operativas no quarto, as mesmas diminuíram igualmente, do cenário 8.2.11 para 8.2.8, sendo o abaixamento máximo ocorrido em Montalegre no valor de 0,7°C. Quanto à temperatura mínima no quarto esta diminuiu, igualmente, do cenário 8.2.11 para o 8.2.8, sendo que o maior decréscimo foi de 0,5°C em Beja.

No Quadro 8.62 apresentam-se as variações deste cenário 8.2.11 face ao 8.2.8, das temperaturas das superfícies da cobertura e da esteira.

Quadro 8.62
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.2.11 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.2.11 face ao 8.2.8)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	-0,5	+0,2
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	-0,7	+0,2
	Face superior da esteira	+2,7	+12,8	-3,9
	Face inferior da esteira	+0,6	+0,3	+0,7
Maia	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	-0,5	+0,1
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	-0,7	+0,2
	Face superior da esteira	+1,8	+12,2	-4,1
	Face inferior da esteira	+0,5	+0,2	+0,6
Beja	Face exterior da cobertura oeste	+0,0	-0,5	+0,2
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	-0,7	+0,3
	Face superior da esteira	+2,6	+13,8	-5,0
	Face inferior da esteira	+0,5	0,0	+0,8
Petrolina	Face exterior da cobertura oeste	0,0	-0,7	+0,2
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	-0,9	+0,2
	Face superior da esteira	+2,2	+15,7	-3,9
	Face inferior da esteira	+0,3	0,0	+0,8
Dili	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	-0,5	+0,2
	Face interior da cobertura oeste	0,0	-0,6	+0,2
	Face superior da esteira	+3,7	+12,8	+0,1
	Face inferior da esteira	+0,1	0,0	+0,1

Da análise dos valores do Quadro anterior, realça-se que com a aplicação de 8 cm de lã de rocha na esteira e face ao cenário 8.2.8, evidencia-se que surge um aumento em todas as localidades, da temperatura, média e máxima, tanto da face superior como da face inferior da esteira, chegando-se, em Montalegre, a valores de incremento da temperatura média do teto do quarto em 0,6°C e da temperatura máxima em 0,3°C. Verifica-se, assim, que no que concerne à temperatura máxima no teto do quarto, os resultados do cenário 8.2.8 de aplicação de ITRBE sob a esteira continuam a provocar valores inferiores.

No respeitante aos fluxos de calor, através da totalidade da esteira, e igualmente do cenário 8.2.11 face ao 8.2.8, apresentam-se, no Quadro 8.63 as variações dos correspondentes valores.

Quadro 8.63

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.2.11 FACE AO 8.2.8, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Esteira -> Quarto (cenário 8.2.11 face ao 8.2.8)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.2.11 (W)	8.2.8 (W)	ΔW (%)	8.2.11 (W)	8.2.8 (W)	ΔW (%)	8.2.11 (W)	8.2.8 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	13,1	-9,5	*	87,6	85,7	+2,2	-84,9	-120,7	-29,7
	Convecção	10,7	-1,1	*	42,4	41,3	+2,7	-32,6	-51,9	-37,2
	Condução	21,7	-12,8	*	128,4	126,7	+1,3	-101,7	-161,0	-36,8
Maia	Radiação	7,5	-11,6	*	80,8	81,5	-0,9	-75,9	-108,2	-29,9
	Convecção	6,9	-3,1	*	37,9	38,2	-0,8	-29,6	-46,8	-36,8
	Condução	12,7	-16,5	*	118,7	120,6	-1,6	-91,5	-143,3	-36,1
Beja	Radiação	12,9	-5,4	*	93,8	108,0	-13,1	-83,8	-119,2	-29,7
	Convecção	10,1	0,5	+1920,0	42,9	49,9	-14,0	-32,1	-50,9	-36,9
	Condução	21,2	-6,7	*	137,1	160,0	-14,3	-101,5	-157,1	-35,4
Petrolina	Radiação	12,9	-1,0	*	104,0	114,6	-9,2	-69,4	-84,8	-18,2
	Convecção	10,3	3,0	+243,3	49,1	54,5	-9,9	-27,0	-35,4	-23,7
	Condução	21,4	0,1	+21300,0	154,4	171,6	-10,0	-78,1	-104,1	-25,0
Dili	Radiação	23,3	19,4	+20,1	87,5	95,5	-8,4	-45,5	-50,5	-9,9
	Convecção	14,8	12,8	+15,6	43,9	48,0	-8,5	-17,6	-19,2	-8,3
	Condução	37,0	31,0	+19,4	131,1	144,2	-9,1	-46,0	-56,9	-19,2

* Inversão do sentido do fluxo de calor.

Da análise do Quadro anterior, é de realçar de que no que concerne ao fluxo de calor entre a esteira leve e o quarto, de que a passagem do cenário 8.2.8 para 8.2.11, em termos médios e em Dili, o fluxo é sempre descendente, sendo que mesmo para a espessura de 8 cm de lã de rocha sobre a esteira, o seu valor é superior ao cenário do uso de ITRBE sob as vertentes da

cobertura. No respeitante aos fluxos de calor máximos (descendentes) da esteira leve para o quarto, verifica-se que a aplicação de ITRBE sob as telhas de cobertura implica, para todas as localidades, com exceção de Montalegre, um ligeiro aumento de fluxo em relação ao uso de mantas de 8 cm de lã de rocha sobre a esteira.

Pela análise global destes resultados de temperaturas e fluxos de calor, verifica-se que no período de temperaturas exteriores mais elevadas, continua a ser mais vantajoso colocar ITRBE sob as telhas de cobertura do que aplicar sobre a esteira mantas de lã de rocha de 8 cm espessura.

8.3 ESTUDO DE VÁRIOS CENÁRIOS NO EDIFÍCIO ISOLADO PELO EXTERIOR, COM COBERTURA DE DUAS ÁGUAS E ESTEIRA LEVE

Verificou-se nos cenários anteriores que, por exemplo, os diferenciais, em percentagem, nas temperaturas resultantes operativas no quarto e superficiais no seu teto, são substancialmente mais baixos do que os relativos aos fluxos de calor que ocorreram entre o teto e o quarto. Daqui se pode inferir, que as temperaturas em causa são originadas devido a outros fatores importantes, que não somente os fluxos de calor provenientes da cobertura, nomeadamente as transmissões de calor através das paredes, envidraçados, portas e pavimento. Assim, nos cenários seguintes, procurou-se reduzir os fluxos de calor através desses elementos, aumentando as espessuras de isolamento térmico e colocando portadas exteriores nos envidraçados. Também foi opção nestes cenários, o de colocar o isolamento térmico pelo exterior, ao contrário dos cenários anteriores em que por exemplo o isolamento das fachadas foi realizado pelo interior, tal e qual aliás é a realidade do edifício em causa.

Assim, nestes cenários 8.3, a envolvente do quarto, apresenta nas paredes isolamento térmico de poliestireno expandido EPS com 8 cm de espessura, aplicado pelo exterior deste espaço útil. O pavimento inclui espuma de polietileno (PEF) com 8 cm de espessura, as portas interiores possuem no seu interior lã de rocha com 4 cm de espessura e as janelas apresentam portadas pelo exterior dos vãos envidraçados.

8.3.1 EDIFÍCIO SEM QUALQUER TIPO DE ISOLAMENTO TÉRMICO NA COBERTURA

8.3.1.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

No Quadro 8.64 apresentam-se os valores das temperaturas do ar exterior e operativas do desvão da cobertura e do quarto, obtidas nos períodos de máxima temperatura exterior.

Quadro 8.64
TEMPERATURAS OPERATIVAS E DO AR NO CENÁRIO 8.3.1 NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Temperaturas operativas dos compartimentos e temperatura do ar exterior (cenário 8.3.1)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Exterior	21,8	31,4	14,0
	Desvão de cobertura	25,2	36,0	17,0
	Quarto	23,6	26,2	21,4
Maia	Exterior	19,8	30,1	12,6
	Desvão de cobertura	23,0	34,4	15,6
	Quarto	21,9	24,7	19,8
Beja	Exterior	26,9	40,2	16,8
	Desvão de cobertura	30,0	42,5	20,6
	Quarto	28,7	31,8	26,0
Petroлина	Exterior	28,1	41,5	19,3
	Desvão de cobertura	30,1	45,0	22,4
	Quarto	29,0	32,7	27,1
Dili	Exterior	31,3	38,8	26,5
	Desvão de cobertura	32,9	42,9	28,1
	Quarto	31,3	33,8	29,8

Realizando uma comparação com o cenário 8.2.5, em que também não se usa qualquer isolamento térmico na cobertura, mas em que o isolamento dos restantes elementos é menor e localizado pelo interior do espaço útil quarto, constata-se de que em relação às temperaturas médias, e em todas as localidades, com exceção de Dili, os valores obtidos no cenário 8.3.1 são menores do que no 8.2.5. Já no respeitante às temperaturas operativas máximas, e como seria de esperar, verifica-se que em todas as localidades, o cenário 8.3.1 implica menores valores do que o cenário 8.2.5, sendo o maior diferencial atingido em Petroлина, com 3,7°C no quarto. Também, como seria de esperar, as temperaturas mínimas operativas em todas as localidades foram superiores no cenário 8.3.1 do que no 8.2.5. É relevante referir que Dili foi

a única localidade em que, do cenário 8.2.5 para o 8.3.1, o aumento da temperatura mínima foi superior à diminuição da temperatura máxima.

No Quadro 8.65 apresentam-se os valores das temperaturas das superfícies da cobertura e da esteira, obtidas nas cinco localidades e nos períodos considerados.

Quadro 8.65
TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA NO CENÁRIO 8.3.1 NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Temperaturas superficiais (cenário 8.3.1)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	26,8	45,3	14,7
	Face interior da cobertura oeste	26,7	44,5	14,9
	Face superior da esteira	24,6	32,0	18,9
	Face inferior da esteira	24,3	30,3	19,6
Maia	Face exterior da cobertura oeste	24,2	43,5	13,3
	Face interior da cobertura oeste	24,1	42,7	13,5
	Face superior da esteira	22,6	30,4	17,4
	Face inferior da esteira	22,4	28,8	18,1
Beja	Face exterior da cobertura oeste	31,5	52,4	17,7
	Face interior da cobertura oeste	31,4	51,5	18,0
	Face superior da esteira	29,5	38,2	22,9
	Face inferior da esteira	29,3	36,4	23,8
Petroлина	Face exterior da cobertura oeste	31,3	55,7	20,1
	Face interior da cobertura oeste	31,2	54,8	20,3
	Face superior da esteira	29,7	40,0	24,4
	Face inferior da esteira	29,5	37,9	25,2
Dili	Face exterior da cobertura oeste	34,5	51,2	27,0
	Face interior da cobertura oeste	34,4	50,5	27,1
	Face superior da esteira	32,3	39,2	28,9
	Face inferior da esteira	32,1	37,7	29,2

Realizando, igualmente, uma comparação com o cenário 8.2.5, verifica-se que no respeitante ao teto do quarto, a sua temperatura média, diminuiu, no cenário 8.3.1, em todas as localidades com exceção de Dili. A localidade em que a temperatura máxima do teto do quarto teve uma maior diminuição do cenário 8.3.1 face ao 8.2.5 foi Petroлина com 2,3°C.

Já no respeitante aos valores dos fluxos de calor por radiação, convecção e condução entre a esteira e o quarto, verifica-se que em termos médios (sendo o fluxo sempre descendente) existe um aumento para todas as localidades, com exceção de Dili, do cenário 8.2.5 para

8.3.1, devido ao facto de que o diferencial de temperatura entre o desvão de cobertura e o quarto serem maiores neste cenário.

8.3.1.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

Nos Quadros 8.66 e 8.67 apresentam-se, respetivamente, os valores das temperaturas do ar exterior e operativas do desvão da cobertura e do quarto, bem como as temperaturas das superfícies da cobertura e da esteira, em Montalegre nos períodos de mínima temperatura exterior.

Quadro 8.66
TEMPERATURAS OPERATIVAS E DO AR NO CENÁRIO 8.3.1 NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Temperaturas operativas dos compartimentos e temperatura do ar exterior (cenário 8.3.1)				
Local	Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Exterior	4,3	9,2	-0,8
	Desvão de cobertura	6,1	10,9	2,2
	Quarto	7,3	8,5	6,2

Quadro 8.67
TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA NO CENÁRIO 8.3.1 NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Temperaturas superficiais (cenário 8.3.1)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	5,5	14,0	-0,1
	Face interior da cobertura oeste	5,6	13,7	0,1
	Face superior da esteira	6,6	9,8	3,9
	Face inferior da esteira	6,8	9,4	4,5

Realizando uma comparação com o cenário 8.2.5, verifica-se que em termos de temperaturas operativas médias, o valor do desvão de cobertura manteve-se inalterado e do quarto diminuiu residualmente 0,1°C. Verifica-se, igualmente, que a temperatura do teto do quarto diminuiu em média 0,1°C, de que a temperatura máxima diminuiu 0,9°C e que a mínima aumentou 0,6°C.

No respeitante aos valores dos fluxos de calor entre a esteira e o quarto, verifica-se que em termos médios (sendo o fluxo sempre ascendente) existe uma diminuição do cenário 8.2.5

para 8.3.1, devido ao facto de que o diferencial de temperatura entre o desvão de cobertura e o quarto serem algo menores neste cenário.

8.3.2 EDIFÍCIO INTEGRANDO ITRBE POR BAIXO DAS VERTENTES DA COBERTURA

8.3.2.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

Neste cenário, a única diferença face ao 8.3.1, é que se colocou ITRBE por baixo das vertentes em telha cerâmica, tal e qual descrito no cenário 8.2.8.

No Quadro 8.68, apresentam-se as variações deste cenário, de aplicação de ITRBE sob as vertentes da cobertura, face ao cenário 8.3.1 de sem qualquer tipo de isolamento na cobertura, dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão de cobertura.

Quadro 8.68
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.2 FACE AO 8.3.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.3.2 face ao 8.3.1)				
Local	Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Desvão de cobertura	-2,4	-8,9	+2,2
	Quarto	-1,4	-2,8	-0,4
Maia	Desvão de cobertura	-1,7	-8,5	+2,4
	Quarto	-1,0	-2,5	0,0
Beja	Desvão de cobertura	-2,2	-9,4	+2,9
	Quarto	-1,4	-3,0	-0,2
Petroliana	Desvão de cobertura	-1,8	-10,6	+2,3
	Quarto	-1,2	-3,1	-0,3
Dili	Desvão de cobertura	-2,3	-8,4	+0,2
	Quarto	-1,4	-2,8	-0,7

Comparando estes valores com os relativos à comparação dos cenários 8.2.8 face ao 8.2.5, com e sem ITRBE na cobertura mas com menores isolamentos térmicos (localizados no interior) na restante envolvente do quarto, verifica-se que as temperaturas operativas médias do quarto tiveram um maior decréscimo entre os cenários 8.3.1 e 8.3.2 do que entre os

cenários 8.2.5 e 8.2.8. No respeitante às temperaturas operativas máximas do quarto, verifica-se que o diferencial entre ter e não ter ITRBE sob as vertentes da cobertura é menor entre os cenários 8.3.1 e 8.3.2 do que entre os cenários 8.2.5 e 8.2.8. Quanto às temperaturas operativas mínimas do quarto, verifica-se que enquanto entre os cenários 8.2.5 e 8.2.8 existe um acréscimo do seu valor quando se aplica ITRBE sob as vertentes da cobertura, já entre os cenários 8.3.1 e 8.3.2 existe uma diminuição dessa mesma temperatura.

Verifica-se, pois, que no que concerne às temperaturas operativas médias do quarto, com uma envolvente mais isolada termicamente, o impacto de se colocar ITRBE sob as vertentes da cobertura é maior no sentido da obtenção de menores temperaturas, mas no que concerne à temperatura operativa máxima do quarto a situação passa-se exatamente ao contrário.

Em relação aos fluxos de calor, constata-se que em muitas situações o fluxo médio que no cenário 8.2.8 era ascendente passa a descendente no cenário 8.3.2, isto porque em 8.3.2 a temperatura do quarto é inferior.

8.3.2.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

No Quadro 8.69, apresentam-se as variações deste cenário, de aplicação de ITRBE sob as vertentes da cobertura, face ao cenário 8.3.1 de sem qualquer tipo de isolamento na cobertura, dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão de cobertura.

Quadro 8.69
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.2 FACE AO 8.3.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.3.2 face ao 8.3.1)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	+0,9	-1,9	+2,9
	Quarto	+0,4	-0,1	+0,9

Comparando estes valores com os relativos à análise das variações dos cenários 8.2.8 face ao 8.2.5, verifica-se que em termos de temperatura média do quarto o diferencial praticamente se

mantém inalterável. Quanto à temperatura máxima e mínima, o diferencial é agora em ambos inferiores em 0,4°C, sendo que a aplicação do ITRBE provoca menores temperaturas máximas e maiores temperaturas mínimas. Conclui-se, pois, que o incremento de isolamento térmico na envolvente do quarto e a sua aplicação pelo exterior não implicou grandes diferenças em termos do efeito da aplicação de ITRBE sob as vertentes da cobertura.

8.3.3 EDIFÍCIO COM LÃ DE ROCHA DE 8 CM DE ESPESSURA POR CIMA DA ESTEIRA LEVE

8.3.3.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

De forma a comparar esta solução tradicional de isolamento térmico com a do uso de ITRBE sob as vertentes da cobertura inclinada em telha cerâmica, realizou-se a comparação entre este cenário e o 8.3.2 para o período de máximas temperaturas exteriores.

Nos Quadros 8.70 e 8.71, apresentam-se as variações deste cenário 8.3.3 em relação ao 8.3.2, respetivamente dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão de cobertura, bem como das superfícies da cobertura e da esteira.

Quadro 8.70
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.3 FACE AO 8.3.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.3.3 face ao 8.3.2)				
Local	Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Desvão de cobertura	+3,3	+12,7	-3,5
	Quarto	-0,2	-0,5	-0,1
Maia	Desvão de cobertura	+2,2	+12,1	-3,8
	Quarto	0,0	-0,3	+0,2
Beja	Desvão de cobertura	+2,9	+13,5	-4,6
	Quarto	-0,1	-0,4	+0,1
Petroliña	Desvão de cobertura	+2,6	+15,5	-3,7
	Quarto	-0,3	-0,7	0,0
Dili	Desvão de cobertura	+3,4	+12,2	-0,4
	Quarto	+0,1	0,0	+0,3

Quadro 8.71

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.3.3 FACE AO 8.3.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.3.3 face ao 8.3.2)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	-0,5	+0,2
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	-0,7	+0,2
	Face superior da esteira	+3,5	+14,0	-4,2
	Face inferior da esteira	-0,2	-0,8	+0,3
Maia	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	-0,6	+0,1
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	-0,7	+0,2
	Face superior da esteira	+2,4	+13,4	-4,4
	Face inferior da esteira	0,0	-0,7	+0,5
Beja	Face exterior da cobertura oeste	0,0	-0,6	+0,2
	Face interior da cobertura oeste	-0,1	-0,7	+0,3
	Face superior da esteira	+3,0	+15,0	-5,4
	Face inferior da esteira	-0,1	-0,8	+0,6
Petrolina	Face exterior da cobertura oeste	0,0	-0,6	+0,2
	Face interior da cobertura oeste	0,0	-0,8	+0,2
	Face superior da esteira	+2,7	+17,1	-4,4
	Face inferior da esteira	-0,3	-1,2	+0,4
Dili	Face exterior da cobertura oeste	-0,1	-0,4	+0,2
	Face interior da cobertura oeste	0,0	-0,6	+0,2
	Face superior da esteira	+3,7	+13,4	-0,7
	Face inferior da esteira	+0,2	-0,4	+0,6

Verifica-se que para estes cenários, em termos de temperatura operativa média no quarto, o uso de mantas de lã de rocha de 8 cm de espessura aplicados sobre a esteira provoca praticamente o mesmo efeito do que o uso de ITRBE sob as vertentes da cobertura inclinada. No respeitante aos valores das temperaturas operativas máximas no quarto, verifica-se que o cenário 8.3.3 é melhor, embora não significativamente, em quatro das cinco localidades, do que o cenário 8.3.2 (com diminuições dos valores entre 0,3°C e 0,7°C), enquanto em Dili, os valores resultantes são exatamente iguais. Fazendo uma comparação destes valores com os obtidos pela comparação dos cenários 8.2.11 com 8.2.8 (com menos isolamento na envolvente e na localização pelo interior dos elementos construtivos), concluiu-se que enquanto nestes a aplicação de ITRBE sob as vertentes da cobertura, tanto em termos de temperaturas operativas médias como máximas no quarto, é sempre mais benéfica (embora com diferenças não muito significativas) do que a colocação sobre a esteira leve de mantas de lã de rocha de 8

cm de espessura, já na presente comparação entre os cenários 8.3.3 e 8.3.2 só em Dili tal situação ocorre.

Já em termos de temperaturas superficiais médias no teto do quarto, os resultados são muito próximos nos dois cenários e quanto ao valor das temperaturas máximas, verifica-se que o cenário 8.3.3 provoca, em todas as localidades, valores algo inferiores ao cenário 8.3.2, nomeadamente entre 0,4° C em Dili e 1,2°C em Petrolina. Fazendo uma comparação destes valores com os obtidos pela comparação dos cenários 8.2.11 com 8.2.8, concluiu-se que enquanto nestes a aplicação de ITRBE sob as vertentes da cobertura, tanto em termos de temperaturas operativas médias como máximas do teto do quarto, é sempre mais benéfica (embora com diferenças não muito significativas) do que a colocação sobre a esteira leve de mantas de lã de rocha de 8 cm de espessura, já na presente comparação entre os cenários 8.3.3 e 8.3.2 tal não acontece.

Sob o ponto de vista dos fluxos médios de calor do quarto para a esteira (ascendentes) verificou-se que o cenário 8.3.3, salvo raríssimas exceções (Petrolina no respeitante ao fluxo por convecção com 0,8%) implicou face ao 8.3.2 acréscimos com algum significado, como é o caso de Beja respetivamente nos valores de 29,2%, 18,2% e 25,5%.

8.3.3.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

No Quadro 8.72, apresentam-se as variações deste cenário 8.3.3, face ao cenário 8.3.2 de aplicação de ITRBE sob as vertentes da cobertura, dos valores das temperaturas operativas obtidas em Montalegre e nos períodos de mínima temperatura exterior.

Quadro 8.72
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.3 FACE AO 8.3.2, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.3.3 face ao 8.3.2)				
Local	Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Desvão de cobertura	-1,5	+2,6	-4,6
	Quarto	+0,2	+0,1	+0,3

Dos resultados inseridos no Quadro anterior, pode-se inferir que no respeitante à temperatura operativa do quarto, a aplicação sobre a esteira de mantas com 8 cm de espessura de lã de rocha (cenário 8.3.3) é levemente melhor do que colocar ITRBE sob as vertentes da cobertura (cenário 8.3.2). Sob o ponto de vista dos fluxos médios de calor por radiação, convecção e condução do quarto para a esteira (ascendentes) verificou-se que o cenário 8.3.3 implicou face ao 8.3.2 reduções relevantes de respetivamente 48,6%, 46,5% e 46,9%, sendo pois neste desiderato evidente a vantagem, em período de baixas temperaturas exteriores, de colocar 8 cm de lã de rocha na esteira face a colocar ITRBE sob as vertentes da cobertura.

8.3.4 EDIFÍCIO COM LÃ DE ROCHA DE 8 CM DE ESPESSURA SOB AS VERTENTES DA COBERTURA

Compara-se, agora, o uso de ITRBE sob as vertentes da cobertura (cenário 8.3.2) com a aplicação de lã de rocha de 8 cm de espessura, também sob a vertente.

No Quadro 8.73, apresentam-se as variações deste cenário 8.3.4 em relação ao 8.3.2, dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão.

Quadro 8.73
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.4 FACE AO 8.3.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.3.4 face ao 8.3.2)				
Local	Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Desvão de cobertura	-0,5	-1,6	+0,4
	Quarto	-0,2	-0,4	-0,1
Maia	Desvão de cobertura	-0,4	-1,6	+0,3
	Quarto	-0,1	-0,3	0,0
Beja	Desvão de cobertura	-0,5	-1,8	+0,4
	Quarto	-0,2	-0,4	-0,1
Petroлина	Desvão de cobertura	-0,3	-1,8	+0,3
	Quarto	-0,2	-0,4	0,0
Dili	Desvão de cobertura	-0,5	-1,6	0,0
	Quarto	-0,2	-0,3	-0,1

Pela observação do Quadro anterior, verifica-se que as temperaturas obtidas no quarto, nos dois cenários, são similares, não existindo assim, neste desiderato, vantagens significativas de um cenário sobre o outro. Em relação à temperatura no desvão de cobertura verifica-se que o cenário 8.3.4 provoca um abaixamento entre 0,3 e 0,5°C da temperatura operativa média e um abaixamento entre 1,6 e 1,8°C da temperatura máxima.

8.3.5 EDIFÍCIO COM ITRBE SOBRE A ESTEIRA LEVE E SOB AS VERTENTES DA COBERTURA

Neste cenário além da colocação de ITRBE sob as vertentes da cobertura, igualmente se o colocou sobre a esteira leve, de forma a verificar se existe vantagem em adicionalmente colocar mais esta camada de ITRBE. Realça-se, que na comparação destes cenários, não foi considerada a intervenção do pó que com o tempo diminui o desempenho do ITRBE.

No Quadro 8.74, apresentam-se as variações deste cenário 8.3.5 em relação ao 8.3.2 (só ITRBE sob as vertentes da cobertura), dos valores das temperaturas no quarto e no desvão.

Quadro 8.74
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.5 FACE AO 8.3.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.3.5 face ao 8.3.2)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	+0,6	+1,1	0,0
	Quarto	-0,1	-0,2	0,0
Maia	Desvão de cobertura	+0,3	+0,9	-0,3
	Quarto	0,0	-0,1	+0,1
Beja	Desvão de cobertura	+0,6	+1,1	-0,2
	Quarto	0,0	-0,1	0,0
Petroлина	Desvão de cobertura	+0,8	+1,6	0,0
	Quarto	-0,1	-0,2	+0,1
Dili	Desvão de cobertura	1,0	+1,6	+0,5
	Quarto	+0,2	+0,2	+0,3

Pela análise do Quadro anterior, verifica-se que a colocação adicional, além de sob as vertentes da cobertura, de uma camada de ITRBE sobre a esteira leve pouca influência provoca no respeitante às temperaturas operativas obtidas no quarto.

8.3.6 EDIFÍCIO COM LÃ DE ROCHA DE 8 CM DE ESPESSURA SOBRE A ESTEIRA LEVE E ITRBE, COM PÓ, SOB AS VERTENTES DA COBERTURA

De forma a verificar-se qual o comportamento de se conjugar isolamento térmico resistivo, com refletante de baixa emissividade, desenvolveu-se o cenário de se colocar mantas de 8 cm de lã de rocha sobre a esteira e ITRBE sob as vertentes da cobertura.

No Quadro 8.75, apresentam-se as variações deste cenário face ao 8.3.3, de colocação de somente 8 cm da lã de rocha sobre a esteira, dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão.

Quadro 8.75
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.6 FACE AO 8.3.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.3.6 face ao 8.3.3)				
Local	Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Desvão de cobertura	-1,8	-7,9	+2,2
	Quarto	-0,3	-0,5	-0,1
Maia	Desvão de cobertura	-1,4	-7,7	2,1
	Quarto	-0,2	-0,4	-0,1
Beja	Desvão de cobertura	-1,6	-8,3	2,7
	Quarto	-0,3	-0,5	-0,1
Petrolinea	Desvão de cobertura	-1,1	-9,2	+2,3
	Quarto	-0,2	-0,4	-0,1
Dili	Desvão de cobertura	-1,3	-7,0	+0,8
	Quarto	-0,2	-0,4	-0,1

Verifica-se, assim, que, existindo 8 cm de espessura de lã de rocha sobre a esteira leve, a colocação adicional de ITRBE sob as vertentes da cobertura, provoca, unicamente, no

respeitante às temperaturas operativas ocorridas no quarto, um abaixamento do valor médio entre 0,2 e 0,3°C e em termos máximos um abaixamento entre 0,4° e 0,5°C. Já em relação às temperaturas operativas do desvão de cobertura, a colocação adicional do ITRBE provoca em termos médios um abaixamento entre 1,1 (em Petrolina) e 1,8°C (em Montalegre) e em termos máximos um decréscimo entre 7,0 (em Dili) e 9,2°C (em Petrolina).

No Quadro 8.76 apresentam-se as variações deste cenário 8.3.6 face ao 8.3.3, das temperaturas das superfícies da cobertura e da esteira.

Quadro 8.76
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DA ESTEIRA, DO CENÁRIO 8.3.6 FACE AO 8.3.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.3.6 face ao 8.3.3)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,5	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,2	+0,7	-0,2
	Face superior da esteira	-1,9	-8,2	+2,3
	Face inferior da esteira	-0,3	-0,9	-0,1
Maia	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,6	-0,1
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+0,7	-0,2
	Face superior da esteira	-1,5	-8,1	+2,2
	Face inferior da esteira	-0,3	-0,9	+0,1
Beja	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,6	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+0,7	-0,3
	Face superior da esteira	-1,6	-8,6	+2,9
	Face inferior da esteira	-0,3	-1,0	+0,1
Petrolina	Face exterior da cobertura oeste	0,0	+0,7	-0,2
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+0,9	-0,2
	Face superior da esteira	-1,1	-9,6	+2,3
	Face inferior da esteira	-0,3	-0,9	+0,1
Dili	Face exterior da cobertura oeste	+0,1	+0,5	-0,1
	Face interior da cobertura oeste	+0,1	+0,7	-0,2
	Face superior da esteira	-1,4	-7,3	+0,8
	Face inferior da esteira	-0,3	-0,7	-0,1

Da análise dos valores do Quadro anterior, realça-se que com a aplicação, suplementar às mantas de 8 cm de espessura de lã de rocha na esteira leve, de ITRBE sob as vertentes da cobertura, a temperatura média do teto do quarto decresce 0,3°C em todas as localidades e a máxima decresce entre 0,7 (em Dili) e 1,0°C (em Beja).

Já quanto à temperatura da superfície superior da esteira (por cima da lã de rocha) a temperatura média decresceu entre 1,1°C (em Petrolina) e 1,9°C (em Montalegre) e a máxima entre 7,3°C (em Dili) e 9,6°C (em Petrolina). Verifica-se pois que, embora no desvão de cobertura a influência do ITRBE seja importante, já no respeitante ao quarto tal influência acaba por ser relativamente reduzida.

No respeitante aos fluxos de calor e igualmente do cenário 8.3.6 face ao 8.3.3, verifica-se que a inclusão do ITRBE sob as vertentes da cobertura, proporcionou uma redução do fluxo médio da esteira para o quarto entre 28,2% (em Petrolina) e 47,9% (na Maia) no respeitante à radiação; entre 24,6% (em Dili) e 47,8% (na Maia) no respeitante à convecção e entre 28,1% (em Petrolina) e 50,2% (na Maia) no respeitante à condução, o que permite concluir que em termos de fluxos de calor, a inclusão do ITRBE sob as vertentes da cobertura não é nada negligenciável, como se pode evidenciar no caso da Maia em que existe uma redução média de cerca de 50% do fluxo de calor descendente que chega ao quarto.

8.3.7 ITRBE APLICADO SOB AS VERTENTES DA COBERTURA E NA CAIXA DE AR ESTANQUE SOBRE A ESTEIRA LEVE COM 8 CM DE LÃ DE ROCHA

Neste cenário colocou-se por cima da esteira leve, mantas de lã de rocha com 8 cm de espessura e por cima destas um ITRBE, só que desta vez no interior de uma caixa de ar estanque de 4 cm de espessura, com paredes em derivado da madeira MDF. De resto, usou-se os mesmos materiais já utilizados no cenário 8.3.6, realçando-se que se considerou a influência do pó no comportamento do ITRBE sob as vertentes da cobertura. Esta solução permite ganhar uma resistência térmica adicional pela existência da caixa de ar estanque, além de que resolve o problema da deposição de pó no ITRBE disposto sobre a esteira.

Apresentam-se no Quadro 8.77, as variações entre estes cenários, 8.3.7 e 8.3.6, dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão.

Quadro 8.77

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.7 FACE AO 8.3.6, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.3.7 face ao 8.3.6)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	0,0	-2,4	+1,7
	Quarto	0,0	-0,1	+0,1
Maia	Desvão de cobertura	0,0	-2,4	+1,4
	Quarto	0,0	-0,1	+0,1
Beja	Desvão de cobertura	0,0	-2,9	+1,9
	Quarto	0,0	-0,2	+0,1
Petroлина	Desvão de cobertura	+0,2	-2,8	+1,7
	Quarto	0,0	-0,2	0,0
Dili	Desvão de cobertura	-0,1	-2,1	+0,6
	Quarto	0,0	-0,2	0,0

Constata-se que este cenário 8.3.7 face ao 8.3.6, implica em relação à temperatura operativa do quarto, inalteração para todas as localidades do seu valor médio e decréscimos entre 0,1 e 0,2°C do seu valor máximo. No respeitante à temperatura operativa do desvão de cobertura, verificou-se inalteração dos valores médios com exceção de acréscimos de 0,2°C em Petroлина e decréscimos de 0,1°C em Dili. Quanto aos valores máximos da temperatura operativa do desvão de cobertura resultou em decréscimos entre 2,1° (em Dili) e 2,9°C (em Beja) do seu valor máximo. Constatou-se, igualmente, que este cenário 8.3.7 face ao 8.3.6 implicou em relação à temperatura do teto do quarto, valores médios inalterados, com exceção em Petroлина, que apresenta um valor superior em 0,1°C, e decréscimos entre 0,3 e 0,4°C do seu valor máximo.

Pela análise dos resultados anteriores, bem como dos referentes aos fluxos de calor, pode-se apontar a grande proximidade de resultados dos dois cenários, com exceção das temperaturas máximas do desvão que apresentam melhores resultados com a aplicação do ITRBE sobre a lâ de rocha da esteira e no interior de uma caixa de ar estanque (cenário 8.3.7).

Igualmente se considerou a possibilidade do ITRBE a ser colocado sobre a esteira, em vez de estar sobre a lâ de rocha, estar aplicado sob o MDF da caixa de ar. Comparando os valores das

temperaturas operativas para o quarto e o desvão, obtidas nas duas situações, pode-se dizer que são praticamente as mesmas. Já no respeitante aos fluxos de calor estes foram algo menores na situação do ITRBE a nível superior da caixa de ar sobre a esteira. Pode-se, assim, concluir que é mais indicado colocar o ITRBE sob o MDF (a nível superior dentro da caixa de ar estanque) do que sobre a lã de rocha (a nível inferior da caixa de ar estanque).

8.3.8 ITRBE SOMENTE NA PARTE SUPERIOR DE CAIXA DE AR SOBRE A ESTEIRA LEVE COM 4 CM DE LÃ DE ROCHA

Neste cenário a única diferença sobre o anterior é que se retirou o ITRBE sob as vertentes da cobertura e colocou-se somente 4 cm de espessura de lã de rocha sobre a esteira. Essencialmente o objetivo é comparar os respetivos resultados com os da aplicação de somente mantas de lã de rocha de 8 cm de espessura sobre a esteira leve (cenário 8.3.3).

8.3.8.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

No Quadro 8.78, apresentam-se as variações deste cenário 8.3.8 face ao 8.3.3, de colocação de 8 cm de espessura de lã de rocha sobre a esteira, dos valores das temperaturas operativas no quarto e no desvão.

Quadro 8.78
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.3.8 FACE AO 8.3.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.3.8 face ao 8.3.3)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Desvão de cobertura	0,0	-1,7	+0,6
	Quarto	0,0	-0,1	+0,1
Maia	Desvão de cobertura	0,0	-1,6	+0,6
	Quarto	0,0	-0,1	+0,1
Beja	Desvão de cobertura	0,0	-1,7	+0,8
	Quarto	0,0	-0,2	+0,1
Petroлина	Desvão de cobertura	+0,1	-2,2	+0,6
	Quarto	0,0	-0,2	0,0
Dili	Desvão de cobertura	0,0	-1,7	+0,3
	Quarto	-0,1	-0,3	-0,1

Nas Figuras 8.35 e 8.36 apresentam-se, como exemplo, gráficos elucidativos das variações das temperaturas exterior e operativas das várias zonas em estudo no edifício situado em Dili, respetivamente nos cenários 8.3.3 e 8.3.8.

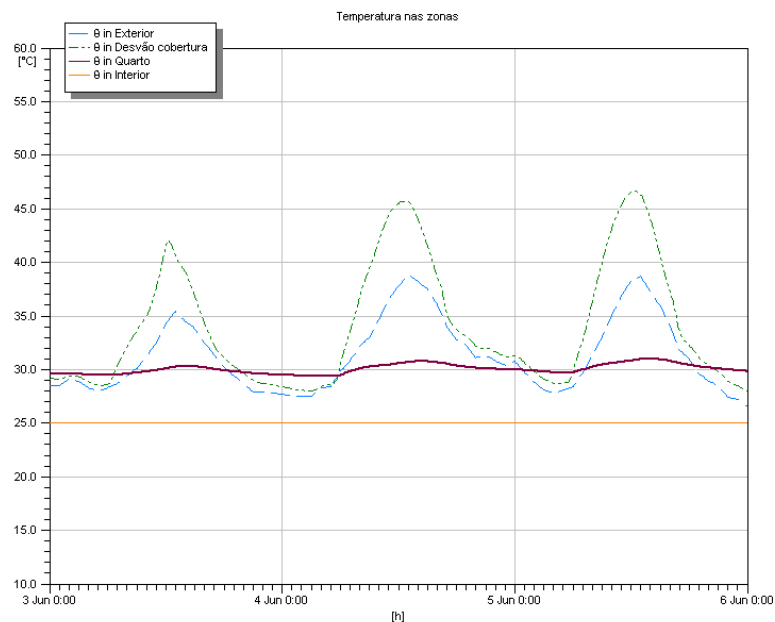


Figura 8.35
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.3.3 E PARA DILI NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

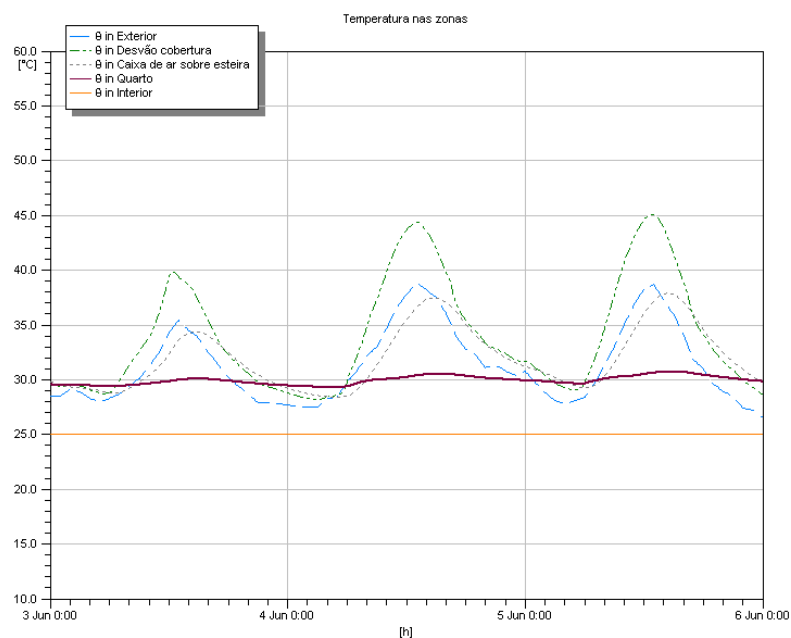


Figura 8.36
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.3.8 E PARA DILI NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Ao analisar o Quadro e Figuras anteriores, verifica-se que em termos de temperaturas operativas médias no quarto e no desvão de cobertura os valores são iguais, com exceção de Dili em que o cenário 8.3.8 implicou ligeiras diminuições. Já no que concerne às temperaturas máximas, é evidente, para o desvão de cobertura, o melhor comportamento do cenário 8.3.8 face ao 8.3.3. No que concerne às temperaturas superficiais máximas do teto do quarto, verificou-se igualmente ligeiras diminuições no cenário 8.3.8 face ao 8.3.3.

No respeitante aos fluxos de calor, através da totalidade da esteira, e igualmente do cenário 8.3.8 face ao 8.3.3, apresentam-se no Quadro 8.79 as respetivas variações.

Quadro 8.79

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.3.8 FACE AO 8.3.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Esteira -> Quarto (cenário 8.3.8 face ao 8.3.3)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.3.8 (W)	8.3.3 (W)	ΔW (%)	8.3.8 (W)	8.3.3 (W)	ΔW (%)	8.3.8 (W)	8.3.3 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	23,9	25,3	-5,5	82,8	100,8	-17,9	-34,3	-37,7	-9,0
	Convecção	13,5	14,2	-4,9	40,4	47,2	-14,4	-13,7	-14,0	-2,1
	Condução	36,0	38,0	-5,3	122,0	148,4	-17,8	-50,2	-52,4	-4,2
Maia	Radiação	15,5	16,5	-6,1	80,1	97,0	-17,4	-32,8	-36,0	-8,9
	Convecção	8,7	9,2	-5,4	37,9	43,9	-13,7	-14,9	-14,1	+5,7
	Condução	23,1	24,5	-5,7	116,4	141,2	-17,6	-48,8	-50,6	-3,6
Beja	Radiação	19,0	20,8	-8,7	88,8	109,8	-19,1	-41,6	-47,4	-12,2
	Convecção	12,1	13,0	-6,9	43,8	50,4	-13,1	-16,8	-17,0	-1,2
	Condução	29,8	32,5	-8,3	130,3	160,7	-18,9	-60,3	-65,2	-7,5
Petrolina	Radiação	20,2	20,2	0,0	102,8	123,7	-16,9	-34,2	-37,5	-8,8
	Convecção	12,7	12,7	0,0	49,7	57,1	-13,0	-11,3	-10,3	+9,7
	Condução	31,9	32	-0,3	151,1	181,9	-16,9	-45,4	-48,5	-6,4
Dili	Radiação	16,0	19,8	-19,2	68,3	88,5	-22,8	-20,9	-14,1	+48,2
	Convecção	15,3	17,5	-12,6	40,1	48,6	-17,5	-4,9	-	-
	Condução	30,5	36,4	-16,2	107,3	137,5	-22,0	-26,4	-12,2	+116,4

Pela análise dos resultados dos fluxos de calor médios e máximos descendentes apresentados no Quadro anterior, pode-se apontar os menores valores, em geral, decorrentes do cenário 8.3.8 em relação ao 8.3.3.

Pode-se, assim, inferir pelos resultados das temperaturas e dos fluxos de calor de que no período de máximas temperaturas exteriores entre duplicar de 4 para 8 cm a espessura da manta de lã de rocha sobre a esteira ou, em alternativa, colocar por cima dos 4 cm de espessura de lã de rocha, uma caixa de ar estanque com ITRBE aplicado na sua face interior superior, é mais benéfico este último cenário.

8.3.8.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

De forma a verificar se as conclusões tiradas atrás, no período de máximas temperaturas exteriores, também se podem aplicar ao período de mínimas temperaturas exteriores, apresentam-se a seguir, no Quadro 8.80, e para este período a comparação dos respetivos fluxos de calor, através da totalidade da esteira, entre os cenários 8.3.8 e 8.3.3.

Quadro 8.80
VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ESTEIRA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.3.8 FACE AO 8.3.3, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Esteira -> Quarto (cenário 8.3.8 face ao 8.3.3)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.3.8 (W)	8.3.3 (W)	ΔW (%)	8.3.8 (W)	8.3.3 (W)	ΔW (%)	8.3.8 (W)	8.3.3 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	-11,7	-13,0	-10,0	10,8	19,1	-43,5	-40,4	-43,9	-8,0
	Convecção	-7,0	-7,7	-9,1	3,1	5,3	-41,5	-20,8	-22,9	-9,2
	Condução	-19,3	-21,4	-9,8	12,8	24,1	-46,9	-62,6	-68,2	-8,2

Pela análise dos resultados dos fluxos de calor apresentados no Quadro anterior pode-se apontar os menores valores decorrentes do cenário 8.3.8 em relação ao 8.3.3. Pode-se, assim, inferir dos valores dos fluxos de calor de que também no período de mínimas temperaturas exteriores entre duplicar de 4 para 8 cm a espessura da manta de lã de rocha sobre a esteira ou, em alternativa, colocar por cima dos 4 cm de espessura de lã de rocha, uma caixa de ar estanque com ITRBE aplicado na sua face interior superior, é mais benéfico este último cenário.

8.4 ESTUDO DE VÁRIOS CENÁRIOS NO EDIFÍCIO COM COBERTURA INCLINADA SEM ESTEIRA

8.4.1 SEM QUALQUER ISOLAMENTO TÉRMICO NA COBERTURA

Neste cenário usou-se os mesmos materiais já utilizados no cenário 8.3.1 (edifício com isolamento pelo exterior, com esteira leve e sem qualquer isolamento na cobertura) só que com a diferença de se ter retirado a esteira sobre o quarto, provocando tal que o volume do quarto integre igualmente o que em 8.3.1 era o desvão de cobertura. Importa, igualmente, referir que se considerou uma renovação horária (1 RPH) para o ar do quarto.

8.4.1.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

No Quadro 8.81 apresentam-se os valores das temperaturas do ar exterior e operativas do quarto.

Quadro 8.81
TEMPERATURAS OPERATIVAS E DO AR NO CENÁRIO 8.4.1 NO PERÍODO DE MÁXIMA
TEMPERATURA EXTERIOR

Temperaturas operativas dos compartimentos e temperatura do ar exterior				
Local	Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Exterior	21,8	31,4	14,0
	Quarto	25,4	32,2	20,0
Maia	Exterior	19,8	30,1	12,6
	Quarto	23,1	30,4	18,1
Beja	Exterior	26,9	40,2	16,8
	Quarto	30,3	38,4	24,1
Petrolina	Exterior	28,1	41,5	19,3
	Quarto	30,1	39,7	25,2
Dili	Exterior	31,3	38,8	26,5
	Quarto	32,6	39,0	29,3

Da análise do Quadro anterior, constata-se que em todas as localidades, com exceção de Beja e Petrolina, no respeitante à temperatura máxima, as temperaturas operativas médias, máximas e mínimas do quarto são superiores às homólogas temperaturas do ar exterior.

No Quadro 8.82 apresentam-se os valores das temperaturas das superfícies da cobertura.

Quadro 8.82
TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA NO CENÁRIO 8.4.1 NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Temperaturas superficiais				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura Oeste	26,8	44,4	15,4
	Face interior da cobertura Oeste	26,7	43,2	15,9
Maia	Face exterior da cobertura Oeste	24,2	42,5	13,9
	Face interior da cobertura Oeste	24,1	41,3	14,3
Beja	Face exterior da cobertura Oeste	31,6	51,4	18,5
	Face interior da cobertura Oeste	31,4	50,1	19,1
Petroлина	Face exterior da cobertura Oeste	31,3	54,4	20,8
	Face interior da cobertura Oeste	31,2	52,9	21,2
Dili	Face exterior da cobertura Oeste	34,4	50,3	27,3
	Face interior da cobertura Oeste	34,2	49,2	27,6

Da análise do Quadro anterior, constata-se que em todas as localidades as temperaturas médias, máximas e mínimas tanto da face exterior da cobertura como da face interior (teto do quarto) são substancialmente superiores às homólogas temperaturas do ar exterior. No respeitante aos fluxos de calor através da cobertura (teto do quarto) estes apresentam-se, mais à frente integrados na comparação entre os cenários 8.4.2 e 8.4.1.

8.4.1.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

Nos Quadros 8.83 e 8.84 apresentam-se, respetivamente, para Montalegre, os valores das temperaturas do ar exterior e operativas do quarto, bem como as superficiais da cobertura.

Quadro 8.83
TEMPERATURAS OPERATIVAS E DO AR NO CENÁRIO 8.4.1 NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Temperaturas operativas e do ar exterior			
Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Exterior	4,3	9,2	-0,8
Quarto	6,2	9,3	3,7

Quadro 8.84
TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA NO CENÁRIO 8.4.1 NO PERÍODO DE MÍNIMA
TEMPERATURA EXTERIOR

Temperaturas superficiais			
Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
	°C	°C	°C
Face exterior da cobertura Oeste	6,0	14,0	0,0
Face interior da cobertura Oeste	6,0	13,0	1,0

Constata-se, assim, que as temperaturas operativas do quarto são superiores às temperaturas do ar exterior, bem como o mesmo se passa para as temperaturas superficiais da cobertura. No respeitante aos fluxos de calor pela cobertura (teto do quarto) estes apresentam-se, mais à frente integrados na comparação entre os cenários 8.4.2 e 8.4.1.

8.4.2 COM ITRBE SOB AS VERTENTES DA COBERTURA

Em relação ao cenário anterior, a diferença é que colocou-se o ITRBE sob as vertentes da cobertura, comparando-se, assim, os resultados deste cenário com os do anterior 8.4.1.

8.4.2.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

No Quadro 8.85, apresentam-se as variações deste cenário 8.4.2 face ao 8.4.1, dos valores das temperaturas operativas do quarto.

Quadro 8.85
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.4.2 FACE AO 8.4.1, NO PERÍODO
DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.4.2 face ao 8.4.1)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Quarto	-3,0	-7,5	+0,5
Maia	Quarto	-2,0	-6,8	+1,2
Beja	Quarto	-2,8	-8,0	+1,0
Petrolina	Quarto	-2,2	-8,4	+1,0
Dili	Quarto	-2,7	-7,0	-0,6

Dos resultados do Quadro anterior, constata-se uma significativa diminuição das temperaturas operativas médias e máximas do quarto, em especial as últimas, provocado pela aplicação do ITRBE sob as vertentes da cobertura. Quanto à temperatura mínima, e com exceção de Dili, o ITRBE provoca um ligeiro aumento entre 0,5°C em Montalegre e 1,2°C na Maia.

De forma a exemplificar, para todo o período considerado, a diferença de comportamento entre não ter e ter ITRBE sob as vertentes da cobertura, apresentam-se, respetivamente, nas Figuras 8.37 e 8.38, e para o caso de Beja, os gráficos das variações das temperaturas.

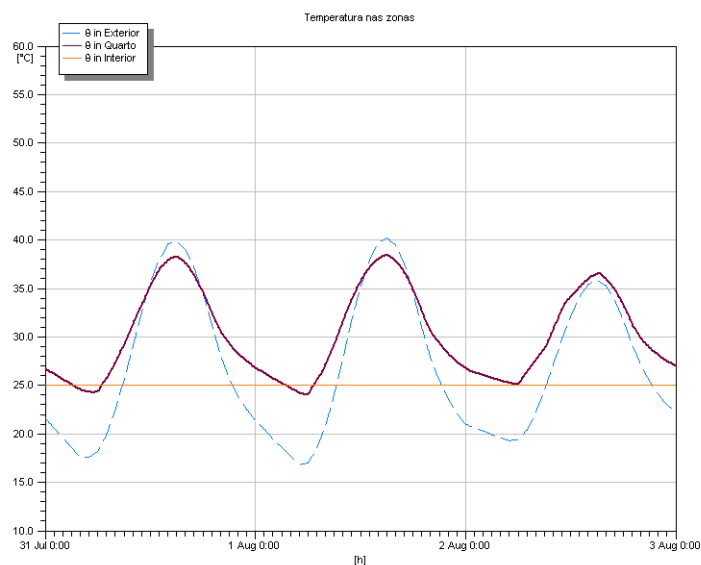


Figura 8.37

TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.4.1 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

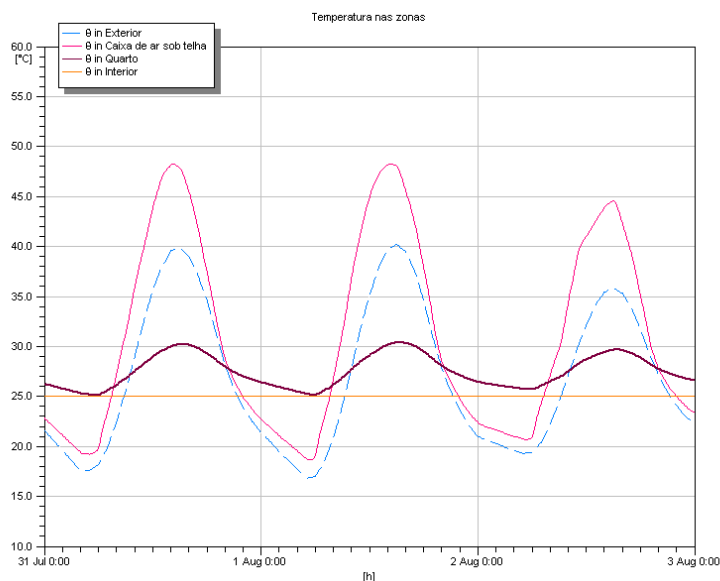


Figura 8.38

TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.4.2 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Efetivamente, ao analisar-se os gráficos anteriores, é por demais evidente que a colocação de ITRBE sob as vertentes da cobertura provoca um abaixamento das temperaturas operativas máximas (período diurno) no quarto muito mais significativo do que o aumento das temperaturas mínimas (período noturno), resultando, pois, em termos médios uma evidente vantagem líquida.

No Quadro 8.86 apresentam-se as variações deste cenário 8.4.2 face ao 8.4.1, das temperaturas da face exterior e interior (teto do quarto) da cobertura.

Quadro 8.86
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA DO QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.2 FACE AO 8.4.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.4.2 face ao 8.4.1)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura Oeste	+0,3	+2,2	-1,1
	Teto do quarto	-2,7	-11,7	+2,4
Maia	Face exterior da cobertura Oeste	+0,2	+2,3	-1,0
	Teto do quarto	-1,9	-11,2	+2,7
Beja	Face exterior da cobertura Oeste	+0,1	+2,3	-1,3
	Teto do quarto	-2,5	-12,4	+3,3
Petroliana	Face exterior da cobertura Oeste	+0,2	+2,9	-1,1
	Teto do quarto	-2,1	-13,4	+2,7
Dili	Face exterior da cobertura Oeste	+0,3	+2,1	-0,6
	Teto do quarto	-2,7	-10,7	+0,6

Pela análise do Quadro anterior, pode-se inferir que o uso de ITRBE sob as vertentes da cobertura, provoca uma relevante diminuição da temperatura do teto do quarto, em especial no respeitante ao seu valor máximo que chega a atingir menos 13,4°C em Petroliana. Quanto à respetiva temperatura mínima esta aumenta com a aplicação do ITRBE sob as vertentes da cobertura, mas tal aumento é substancialmente inferior à diminuição conseguida da temperatura máxima, o que provoca que, em média e em termos líquidos, o uso do ITRBE traz vantagens significativas. No respeitante à temperatura superficial exterior da cobertura é evidente que com o uso de ITRBE as temperaturas máximas aumentam mais do que diminuem as mínimas.

Em termos de temperaturas superficiais interiores do quarto, e para todo o período considerado, apresentam-se nas Figuras 8.39 e 8.40, e para Beja, a diferença de comportamento entre estes cenários de não ter e ter ITRBE sob as vertentes da cobertura.

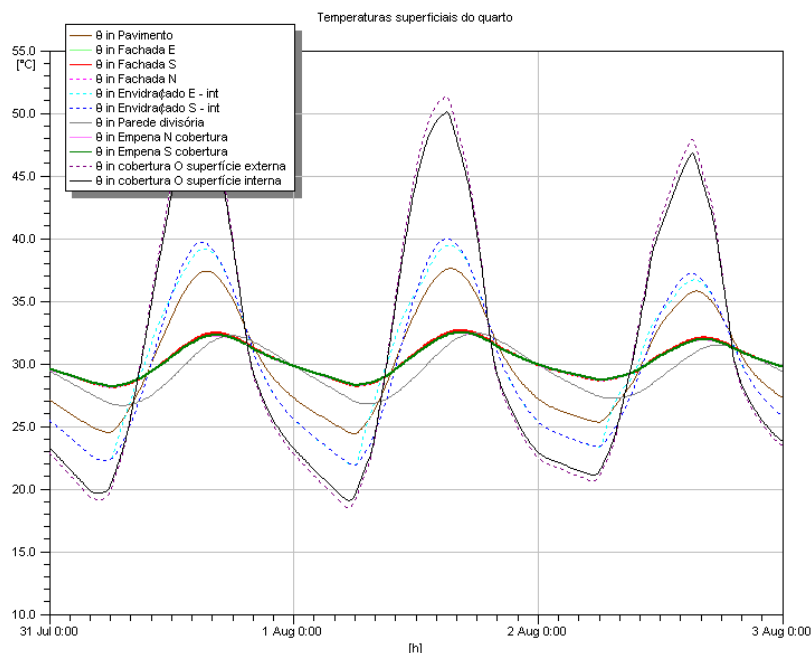


Figura 8.39

TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DO QUARTO NO CENÁRIO 8.4.1 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

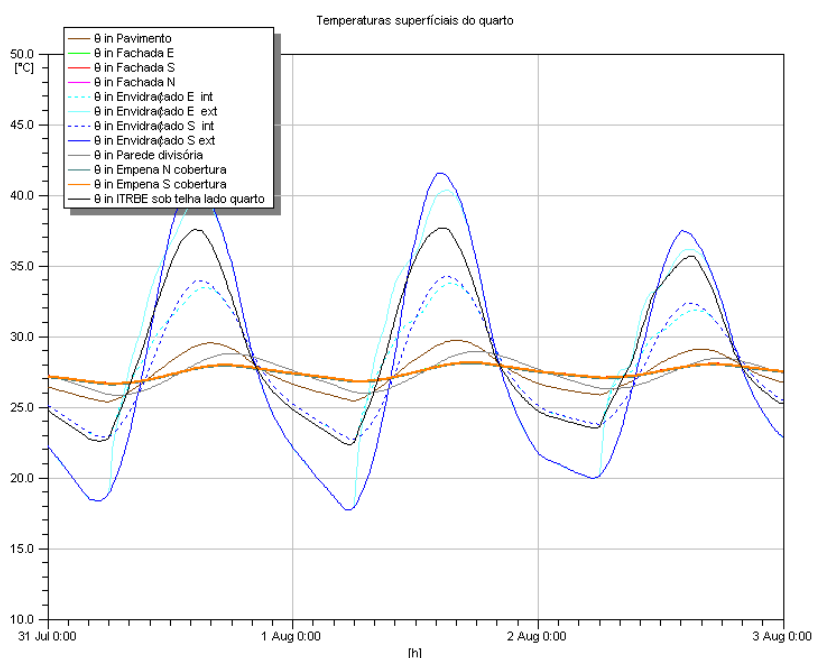


Figura 8.40

TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DO QUARTO NO CENÁRIO 8.4.2 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Pela análise dos dois gráficos anteriores, pode-se verificar o acentuado abaixamento das temperaturas superficiais do quarto após a aplicação do ITRBE sob as vertentes da cobertura, sendo que o abaixamento mais significativo é, como seria de esperar, do teto do quarto. Também é relevante referir que as temperaturas superficiais mais elevadas são as do teto do quarto e dos vidros interiores das janelas (que se relembra têm portadas exteriores ativadas), sendo que com o cenário 8.4.2, após o grande abaixamento da temperatura do teto do quarto, são as superfícies interiores dos vidros interiores que apresentam uma temperatura superficial mais elevada, sendo pois de concluir que existirá aqui um potencial de melhoria em termos do tipo de portadas a usar, situação que será analisada mais à frente.

Apresentam-se no Quadro 8.87 as variações, entre o cenário 8.4.2 e 8.4.1, dos valores dos fluxos de calor, através da totalidade da cobertura.

Quadro 8.87

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.2 FACE AO 8.4.1, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Cobertura -> Quarto (cenário 8.4.2 face ao 8.4.1)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.4.2 (W)	8.4.1 (W)	ΔW (%)	8.4.2 (W)	8.4.1 (W)	ΔW (%)	8.4.2 (W)	8.4.1 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	18,9	89,5	-78,9	88,2	853,8	-89,7	-31,3	-359,8	-91,3
	Convecção	111,4	63,9	+74,3	458,7	458,4	+0,1	-130,5	-165,2	-21,0
	Condução	130	152,2	-14,6	546,8	1323,1	-58,7	-161,9	-534,3	-69,7
Maia	Radiação	12,6	66,2	-81,0	85,9	858,7	-90,0	-31,3	-320	-90,2
	Convecção	79,6	48,7	+63,4	447,2	457,7	-2,3	-131,8	-148,3	-11,1
	Condução	91,9	113,9	-19,3	532,3	1326,3	-59,9	-163,2	-475,6	-65,7
Beja	Radiação	16,6	74,1	-77,6	97,3	927,3	-89,5	-39,6	-426,2	-90,7
	Convecção	99,1	55,7	+77,9	490,6	487,7	+0,6	-165,1	-196	-15,8
	Condução	115,3	129,1	-10,7	587,7	1418,9	-58,6	-204,7	-633,3	-67,7
Petrolina	Radiação	14,5	68,2	-78,7	109,6	1041,1	-89,5	-32,3	-351,9	-90,8
	Convecção	83,2	53,5	+55,5	558,6	557,4	+0,2	-132,9	-155,7	-14,6
	Condução	97,5	120,2	-18,9	668	1622,8	-58,8	-165	-517,9	-68,1
Dili	Radiação	20,3	114,6	-82,3	83,7	783,8	-89,3	-11,7	-190,4	-93,9
	Convecção	111,7	78,1	+43,0	438,4	429,4	+2,1	-43,6	-77,6	-43,8
	Condução	131,9	191,9	-31,3	521,9	1225,4	-57,4	-55,4	-278	-80,1

Da análise do Quadro anterior, verifica-se que a inclusão de ITRBE sob as vertentes da cobertura reduz bastante o fluxo de calor por radiação entre o teto e o correspondente quarto, tanto nos valores médios, como nos máximos. O fluxo de calor por condução também é reduzido, embora em menor grau do que o fluxo por radiação. Quanto ao fluxo de calor por convecção este só é reduzido no que concerne ao fluxo máximo ascendente em todas as localidades estudadas e ao descendente máximo relativo somente à Maia, sendo que todos os restantes fluxos (incluindo os valores médios para todas as localidades) são incrementados ao passar-se do cenário 8.4.1 para o 8.4.2.

É relevante referir que, para todas as cinco localidades estudadas, a forma de transmissão de calor com maiores valores absolutos é a por condução.

Para se clarificar melhor as variações dos vários fluxos de calor ao longo dos períodos estudados, apresentam-se nas Figuras 8.41 e 8.42 gráficos relativos aos fluxos de calor por radiação, convecção e condução, ocorridos em Beja respetivamente nos cenários 8.4.1 (sem ITRBE) e 8.4.2 (com ITRBE sob as vertentes).

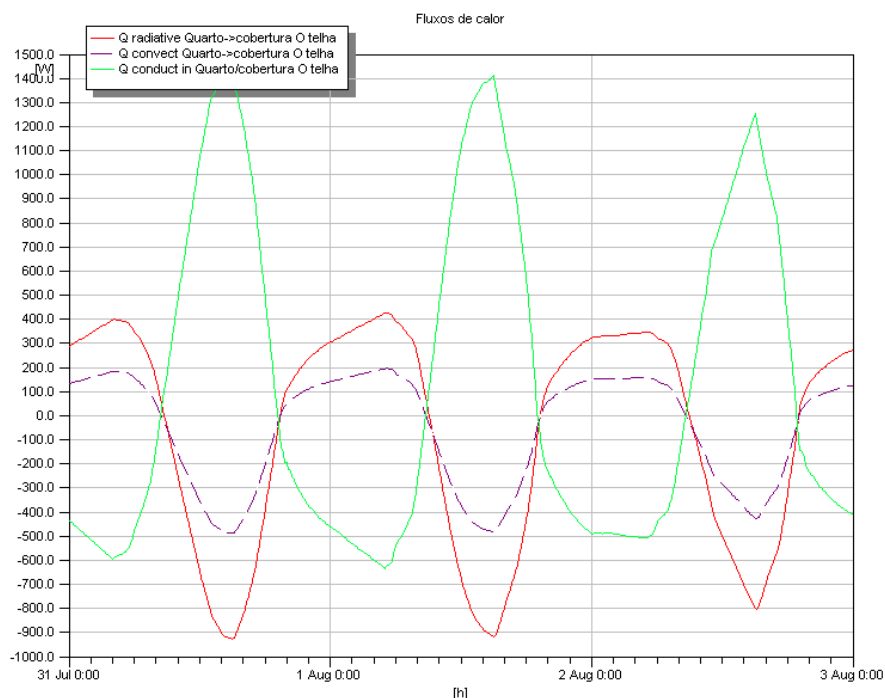
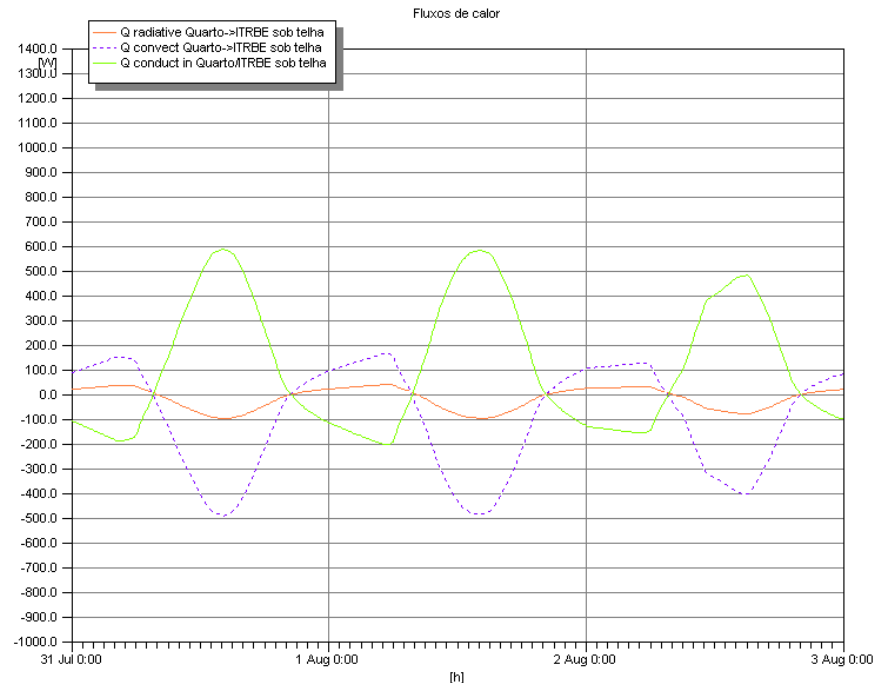


Figura 8.41
FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA (TETO DO QUARTO) E O QUARTO NO CENÁRIO 8.4.1 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

**Figura 8.42**

FLUXOS DE CALOR ENTRE O ITRBE (TETO DO QUARTO) E O QUARTO NO CENÁRIO 8.4.2 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Constata-se, efetivamente, do cenário 8.4.1 para o 8.4.2, uma diminuição, dos fluxos de calor por radiação e condução, sobretudo os primeiros, e uma diminuição do fluxo por convecção ascendente, mantendo-se praticamente o fluxo descendente, o que implica que em termos médios o fluxo por convecção seja maior com a aplicação do ITRBE.

De forma a se verificar, neste cenário, qual a influência da deposição de pó e sujidades sobre o ITRBE, ao longo de cerca de 4 anos, considerou-se, de acordo com os valores obtidos no Capítulo VII, a emissividade da superfície inferior do ITRBE igual a 0,07 e a da superfície superior igual a 0,38, tendo-se verificado que, para todas as localidades consideradas, as temperaturas operativas média e máxima do quarto aumentaram respetivamente entre 0,2 e 0,3°C e entre 0,5 e 0,7°C, que a temperatura média do teto do quarto aumentou entre 0,4 e 0,6°C (não sendo alheio a este facto o maior aumento da respetiva temperatura máxima, entre 2,0 e 2,6°C do que a diminuição da correspondente temperatura mínima, entre 0,1 e 0,7°C) e que as transferências de calor por radiação, convecção e condução foram maiores, sobretudo as primeiras, em que existiram incrementos entre 37,2 e 40,5%, sendo que para a convecção e para a condução os incrementos situaram-se na casa dos 20%.

Efetivamente e na sequência desta análise é por demais evidente que o efeito do pó não pode ser negligenciável quando se realiza a avaliação do comportamento dos ITRBE no conforto térmico dos edifícios nos períodos de máximas temperaturas exteriores.

8.4.2.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

Verificou-se que, para este período e em Montalegre, as variações deste cenário 8.4.2 face ao 8.4.1, das temperaturas operativas médias e mínimas do quarto, aumentaram respetivamente 1,3°C e 2,8°C e a máxima diminuiu 0,6°C. É, pois, evidente, de que com a colocação de ITRBE sob as vertentes da cobertura a temperatura média do quarto é superior, não sendo alheio a tal, o facto de que as temperaturas mínimas foram mais altas do que o abaixamento provocado nas temperaturas máximas.

De forma a se vislumbrar, para todo o período considerado, a diferença de comportamento, entre não ter e ter ITRBE sob as vertentes da cobertura, apresentam-se, respetivamente, nas Figuras 8.43 e 8.44 as variações das temperaturas exterior e operativa do quarto.

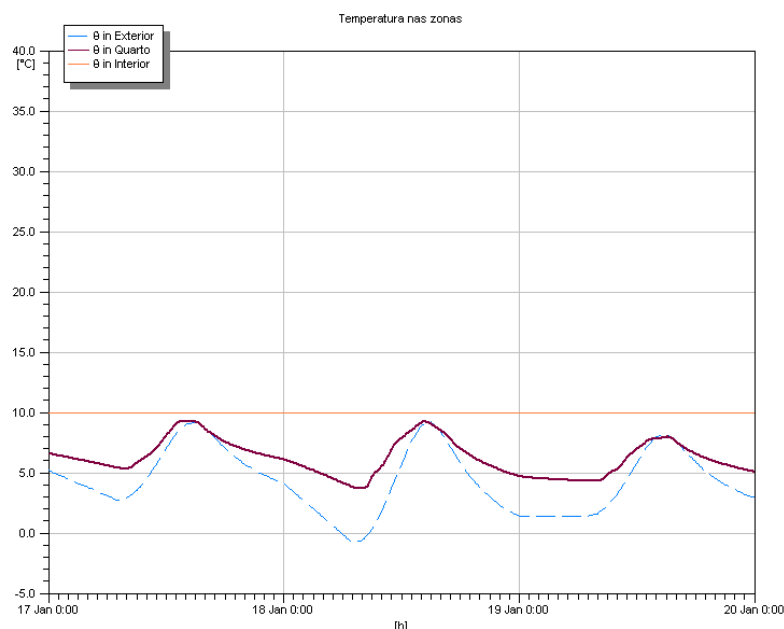


Figura 8.43
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.4.1 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA
TEMPERATURA EXTERIOR

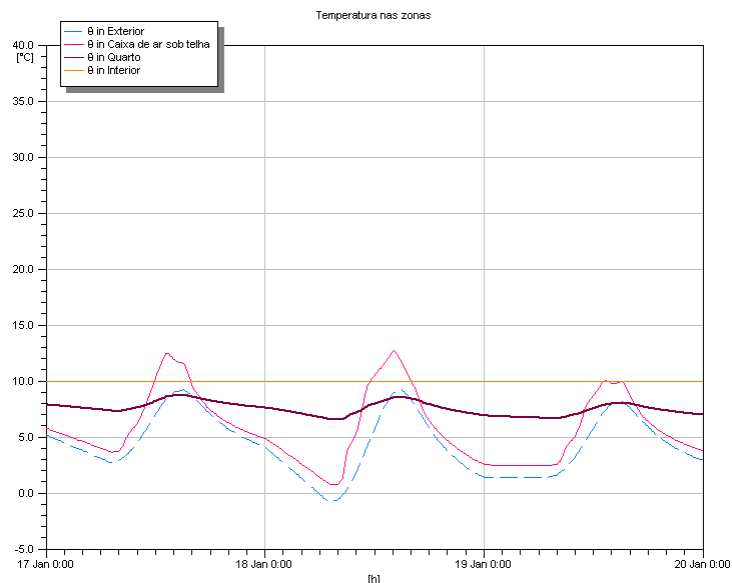


Figura 8.44
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.4.2 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA
TEMPERATURA EXTERIOR

É pois evidente o menor desconforto térmico que o uso de ITRBE sob as vertentes da cobertura provoca no quarto. Em relação à variação da temperatura do teto do quarto, constatou-se que deste cenário 8.4.2 face ao 8.4.1, a média e a mínima aumentaram, respetivamente, 1,2°C e 3,5°C e a máxima diminuiu 3,0°C. Apresentam-se nas Figuras 8.45 e 8.46 e para todo o período considerado, a diferença das temperaturas superficiais do quarto, entre não ter e ter ITRBE sob as vertentes da cobertura.

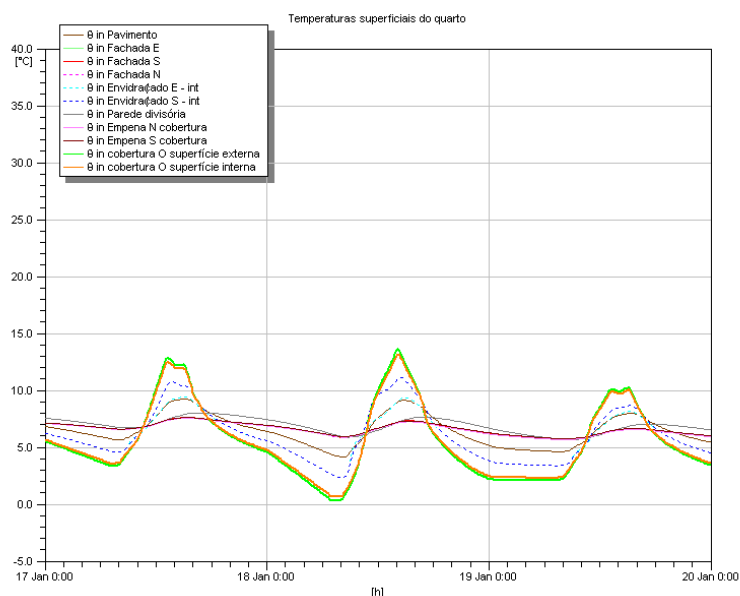
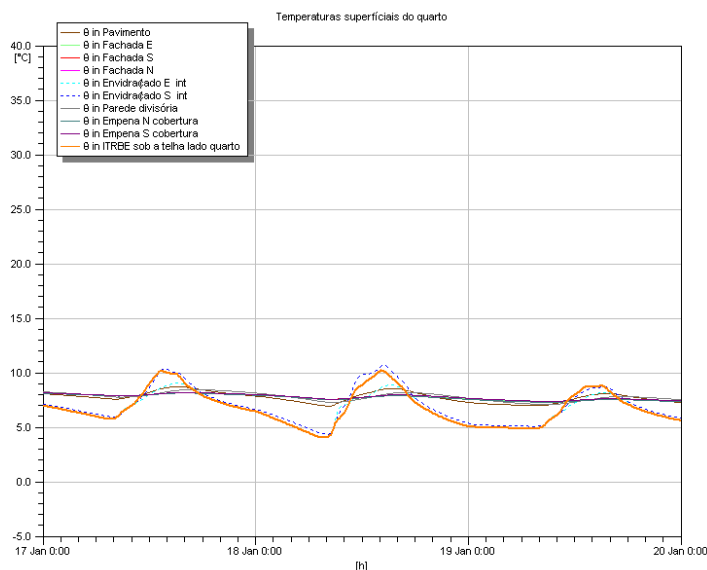


Figura 8.45
TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DO QUARTO NO CENÁRIO 8.4.1 E PARA MONTALEGRE NO
PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

**Figura 8.46**

TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DO QUARTO NO CENÁRIO 8.4.2 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

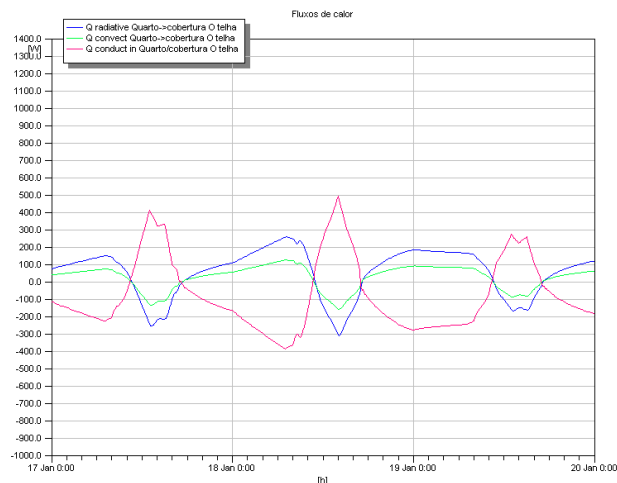
É pois evidente que a inclusão de ITRBE sob as vertentes da cobertura traduz-se numa menor variação das temperaturas das superfícies interiores do quarto. Apresentam-se, agora, no Quadro 8.88, as variações, entre o cenário 8.4.2 e 8.4.1, dos valores dos fluxos de calor, através da totalidade da cobertura do quarto.

Quadro 8.88

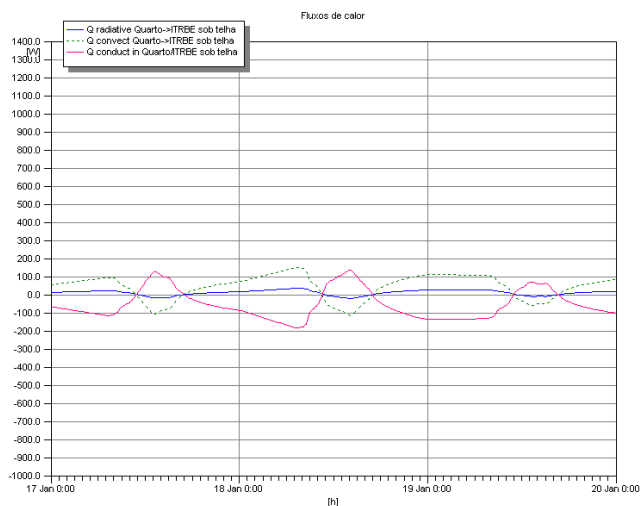
VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.2 FACE AO 8.4.1, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Cobertura -> Quarto (cenário 8.4.2 face ao 8.4.1)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.4.2 (W)	8.4.1 (W)	ΔW (%)	8.4.2 (W)	8.4.1 (W)	ΔW (%)	8.4.2 (W)	8.4.1 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	-10,9	-52,1	-79,1	21,1	309,7	-93,2	-34,6	-257,8	-86,6
	Convecção	-42,8	-24,2	+76,9	115,5	161,9	-28,7	-148,6	-124,5	+19,4
	Condução	-53,8	-77,1	-30,2	136,3	493,0	-72,4	-183,2	-390,4	-53,1

Pela análise dos três Quadros anteriores, é clara a vantagem de se aplicar ITRBE sob as vertentes da cobertura no sentido da diminuição dos fluxos de calor entre o teto e o respetivo quarto, pois como se pode constatar existem em todos os fluxos diminuições significativas com exceção do fluxo ascendente por convecção. Para se clarificar melhor as variações dos vários fluxos de calor ao longo dos períodos estudados, do cenário 8.4.2 face ao 8.4.1, apresentam-se nas Figuras 8.47 e 8.48 gráficos relativos ao que ocorreu através da cobertura.

**Figura 8.47**

FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA (TETO DO QUARTO) E O QUARTO NO CENÁRIO 8.4.1 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

**Figura 8.48**

FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA (TETO DO QUARTO) E O QUARTO NO CENÁRIO 8.4.2 E PARA MONTALEGRE NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

A visualização dos gráficos anteriores, reforça as conclusões já tiradas após a apresentação dos quadros homólogos. São pois evidentes as vantagens de colocação de ITRBE sob as vertentes da cobertura, mesmo no período de menores temperaturas exteriores. Tendo em conta a deposição do pó e sujidades nas superfícies do ITRBE, tal e qual foi considerado no período de maiores temperaturas anuais do ar exterior, verificou-se que a temperatura operativa média do quarto diminui unicamente $0,1^{\circ}\text{C}$, sendo que a máxima aumentou no mesmo valor e a mínima diminuiu $0,2^{\circ}\text{C}$. Já quanto à temperatura média do teto do quarto, esta diminui $0,3^{\circ}\text{C}$, sendo que a temperatura mínima diminuiu $0,7^{\circ}\text{C}$ e a máxima aumentou $0,5^{\circ}\text{C}$. Quanto aos fluxos de calor, verificou-se que existiram maiores transferências de calor

por radiação, convecção e condução, sobretudo em relação às primeiras, em que, em termos médios, o pó e sujidades provocaram incrementos de 33%. Na sequência desta análise, é por demais evidente que o efeito do pó não pode ser igualmente negligenciável, quando se realiza a avaliação do comportamento dos ITRBE no conforto térmico dos edifícios, nos períodos de mínimas temperaturas exteriores, embora é relevante referir que o efeito do pó no período das máximas temperaturas anuais é mais significativo.

8.4.3 COM LÃ DE ROCHA DE 8 CM DE ESPESSURA SOB AS VERTENTES DA COBERTURA

Neste cenário, a diferença face ao anterior, é que em vez de se colocar ITRBE sob as vertentes da cobertura, colocou-se mantas de lã de rocha com 8 cm de espessura. A ideia base, do que se segue, é comparar o comportamento deste cenário com o anterior 8.4.2.

8.4.3.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

No Quadro 8.89, apresentam-se as variações deste cenário 8.4.3 face ao 8.4.2, dos valores das temperaturas operativas médias, máximas e mínimas do quarto, obtidas nas cinco localidades e nos períodos de máxima temperatura exterior.

Quadro 8.89
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS, DO CENÁRIO 8.4.3 FACE AO 8.4.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.4.3 face ao 8.4.2)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Quarto	-0,5	-1,1	0,0
Maia	Quarto	-0,4	-1,1	0,0
Beja	Quarto	-0,5	-1,2	+0,1
Petrolina	Quarto	-0,4	-1,3	0,0
Dili	Quarto	-0,5	-1,1	-0,2

Pela observação do Quadro anterior, pode-se constatar que o uso de 8 cm de lã de rocha em vez do ITRBE sob as vertentes, provocou um abaixamento das temperaturas operativas médias do quarto entre 0,4 e 0,5°C e as máximas entre 1,1 e 1,3°C. De forma a exemplificar para todo o período considerado, e em Beja, a diferença de comportamento entre ou ter

ITRBE ou ter 8 cm de lã de rocha, ambos sob as vertentes da cobertura, apresenta-se, a seguir, na Figura 8.49, gráfico elucidativo dessas variações.

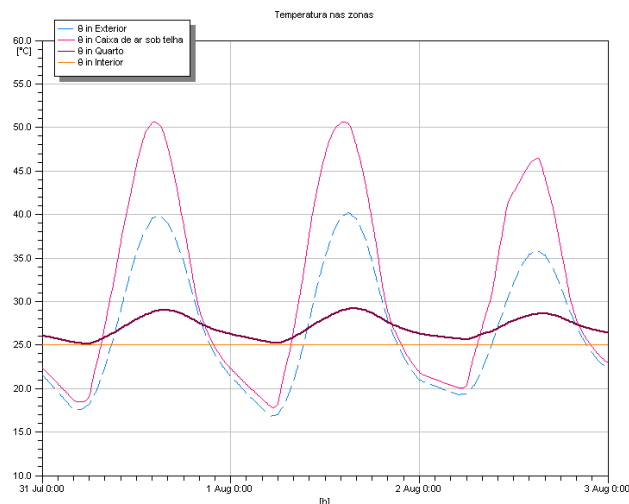


Figura 8.49
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.4.3 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Comparando este gráfico com o da Figura 8.38 (cenário 8.4.2) verificou-se que a aplicação de 8 cm de lã de rocha implicou menores temperaturas (sobretudo as máximas) no quarto. No Quadro 8.90 apresentam-se, agora, as variações deste cenário 8.4.3 face ao 8.4.2, das temperaturas da face exterior e interior da cobertura (esta última, o teto do quarto).

Quadro 8.90
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA DO QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.3 FACE AO 8.4.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.4.3 face ao 8.4.2)				
Local	Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Face exterior da cobertura Oeste	+0,1	+0,3	-0,1
	Teto do quarto	-1,8	-6,9	+1,9
Maia	Face exterior da cobertura Oeste	0,0	+0,3	-0,1
	Teto do quarto	-1,2	-6,6	+2,1
Beja	Face exterior da cobertura Oeste	+0,1	+0,4	-0,1
	Teto do quarto	-1,6	-7,4	+2,5
Petrolina	Face exterior da cobertura Oeste	0,0	+0,4	-0,1
	Teto do quarto	-1,4	-8,3	+2,0
Dili	Face exterior da cobertura Oeste	+0,1	+0,4	0,0
	Teto do quarto	-1,8	-6,6	+0,3

Pode-se, assim, constatar a significativa diminuição que a aplicação da lã de rocha de espessura de 8 cm provoca na temperatura média e máxima do teto do quarto, com variações de menos 1,2°C a 1,8°C na média e de menos 6,6 a 8,3°C na máxima. Quanto à temperatura mínima do teto do quarto, esta aumentou entre 0,3°C e 2,5°C.

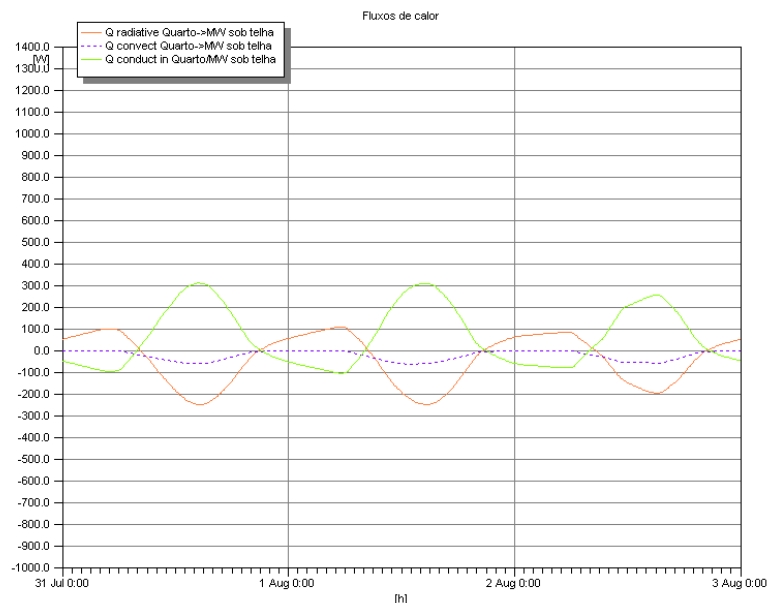
De forma a também se vislumbrar a diferença de comportamento das duas soluções de isolamento térmico, a nível dos fluxos de calor através da totalidade do teto do quarto, apresentam-se no Quadro 8.91, as variações, entre o cenário 8.4.3 e 8.4.2, dos valores dos fluxos de calor entre o teto do quarto e este compartimento, devidos à radiação, convecção e condução.

Quadro 8.91

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.3 FACE AO 8.4.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Cobertura -> Quarto (cenário 8.4.3 face ao 8.4.2)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.4.3 (W)	8.4.2 (W)	ΔW (%)	8.4.3 (W)	8.4.2 (W)	ΔW (%)	8.4.3 (W)	8.4.2 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	46,9	18,9	+148,1	221,8	88,2	+151,5	-85,0	-31,3	+171,6
	Convecção	26,3	111,4	-76,4	71,4	458,7	-84,4	1,2	-130,5	-100,9
	Condução	70,6	130,0	-45,7	287,6	546,8	-47,4	-83,3	-161,9	-48,5
Maia	Radiação	29,7	12,6	+135,7	215,6	85,9	+151,0	-85,2	-31,3	+172,2
	Convecção	21,9	79,6	-72,5	66,8	447,2	-85,1	0,6	-131,8	-100,5
	Condução	49,4	91,9	-46,2	278,9	532,3	-47,6	-85,0	-163,2	-47,9
Beja	Radiação	41,2	16,6	+148,2	249,6	97,3	+156,5	-107,7	-39,6	+172,0
	Convecção	24,1	99,1	-75,7	63,0	490,6	-87,2	1,2	-165,1	-100,7
	Condução	63,0	115,3	-45,4	309,7	587,7	-47,3	-106,1	-204,7	-48,2
Petrolina	Radiação	37,1	14,5	+155,9	277,0	109,6	+152,7	-87,9	-32,3	+172,1
	Convecção	18,5	83,2	-77,8	73,7	558,6	-86,8	-0,3	-132,9	-99,8
	Condução	54,0	97,5	-44,6	349,4	668,0	-47,7	-84,6	-165,0	-48,7
Dili	Radiação	52,3	20,3	+157,6	208,6	83,7	+149,2	-29,7	-11,7	+153,8
	Convecção	21,4	111,7	-80,8	66,7	438,4	-84,8	3,7	-43,6	-108,5
	Condução	72,3	131,9	-45,2	274,2	521,9	-47,5	-23,7	-55,4	-57,2

Para se clarificar melhor as variações dos vários fluxos de calor ao longo dos períodos estudados, apresentam-se na Figura 8.50, gráficos relativos aos fluxos de calor por radiação, convecção e condução, ocorridos em Beja no cenário 8.4.3.

**Figura 8.50**

FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA (TETO DO QUARTO) E O QUARTO NO CENÁRIO 8.4.3 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Verifica-se que o cenário 8.4.3 face ao 8.4.2, implica transferências de calor por radiação substancialmente maiores, mas transferências de calor por convecção e condução significativamente menores, sendo estas últimas no seu conjunto mais relevantes.

8.4.3.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

Comparando as variações dos valores das temperaturas operativas do quarto, obtidas em Montalegre e nos períodos de mínima temperatura exterior, verificou-se que no cenário 8.4.3, face ao 8.4.2, os valores médios e mínimos aumentaram respetivamente 0,2°C e 0,4°C e os máximos diminuíram 0,1°C. Em relação à temperatura superficial do teto do quarto (face inferior da cobertura), verificou-se que no cenário 8.4.3 face ao 8.4.2, os valores médios e mínimos aumentaram respetivamente 0,8°C e 2,5°C e os máximos diminuíram 1,4°C.

Apresentam-se no Quadro 8.92, as variações, entre o dois cenários, dos valores dos fluxos de calor entre a totalidade da cobertura (teto do quarto) e o quarto.

Quadro 8.92

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.3
FACE AO 8.4.2, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Cobertura -> Quarto (cenário 8.4.3 face ao 8.4.2)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.4.3 (W)	8.4.2 (W)	ΔW (%)	8.4.3 (W)	8.4.2 (W)	ΔW (%)	8.4.3 (W)	8.4.2 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	-32,3	-10,9	+196,3	48,6	21,1	+130,3	-96,6	-34,6	+179,2
	Convecção	2,7	-42,8	-106,3	21,8	115,5	-81,1	-2,9	-148,6	-98,0
	Condução	-30,6	-53,8	-43,1	66,4	136,3	-51,3	-99,2	-183,2	-45,9

Verifica-se, assim, que a colocação de lã de rocha, face ao ITRBE, implicou transferências de calor por radiação substancialmente maiores, mas transferências de calor por convecção e condução significativamente menores, sendo estas últimas no seu conjunto mais relevantes que a primeira.

8.4.4 ITRBE COM PÓ, POR BAIXO DE LÃ DE ROCHA COM 8 CM DE ESPESSURA, AMBOS SOB AS VERTENTES DA COBERTURA

Neste cenário a ideia é verificar qual a vantagem em colocar ITRBE, assumindo a deposição, nas suas superfícies, de pó e sujidades, por baixo dos 8 cm de manta de lã de rocha, aplicados sob as vertentes da cobertura, ou seja, analisar se a colocação conjunta destes dois tipos de isolamento, e na posição indicada, é ou não significativamente melhor do que colocar somente a lã de rocha com 8 cm de espessura sob as vertentes da cobertura (cenário 8.4.3). Este estudo foi realizado somente para o período de máximas temperaturas do ar exterior. Assim, ao analisar-se os resultados da temperatura operativa do quarto, verificou-se que este cenário 8.4.4 não originou diferenças de assinalar face ao uso isolado de mantas de lã de rocha com 8 cm de espessura. Em termos de temperaturas operativas médias a redução originada foi de somente 0,1°C em todas as localidades, com exceção da Maia onde não ocorreu qualquer alteração. Mesmo em termos de temperaturas máximas as reduções na temperatura operativa do quarto oscilaram entre 0,1 e 0,2°C.

Em relação às temperaturas superficiais, ressaltou de que com a colocação adicional de ITRBE sob as mantas de 8 cm de lã de rocha, a temperatura média do teto do quarto até sofre

um ligeiro aumento, entre 0,2 e 0,4°C. É igualmente de assinalar o aumento da temperatura máxima do teto do quarto entre 1,8°C (em Dili) e 2,4°C (em Petrolina) e a diminuição da temperatura mínima entre 0,3°C (em Dili) e 1,1 °C (em Beja).

De forma, a se analisar com mais pormenor, a diferença de comportamento dos cenários 8.4.4 e 8.4.3 (só lã de rocha com 8 cm de espessura sob as vertentes da cobertura), apresentam-se no Quadro 8.93 as variações dos respetivos valores dos fluxos de calor através da totalidade da cobertura (ao mesmo tempo teto do quarto).

Quadro 8.93
VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.4 FACE AO 8.4.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Cobertura -> Quarto (cenário 8.4.4 face ao 8.4.3)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.4.4 (W)	8.4.3 (W)	ΔW (%)	8.4.4 (W)	8.4.3 (W)	ΔW (%)	8.4.4 (W)	8.4.3 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	10,6	46,9	-77,4	50,5	221,8	-77,2	-19,2	-85,0	-77,4
	Convecção	52,2	26,3	+98,5	194,9	71,4	+173,0	-48,0	-	-
	Condução	62,4	70,6	-11,6	245,1	287,6	-14,8	-67,2	-83,3	-19,3
Maia	Radiação	6,6	29,7	-77,8	48,9	215,6	-77,3	-19,4	-85,2	-77,2
	Convecção	37,7	21,9	+72,1	188,5	66,8	+182,2	-49,5	-	-
	Condução	44,1	49,4	-10,7	237,0	278,9	-15,0	-68,9	-85,0	-18,9
Beja	Radiação	9,4	41,2	-77,2	56,8	249,6	-77,2	-24,4	-107,7	-77,3
	Convecção	46,8	24,1	+94,2	205,5	63,0	+226,2	-61,1	-	-
	Condução	55,8	63,0	-11,4	262,0	309,7	-15,4	-85,6	-106,1	-19,3
Petrolina	Radiação	8,6	37,1	-76,8	63,0	277,0	-77,3	-19,8	-87,9	-77,5
	Convecção	39,5	18,5	+113,5	232,8	73,7	+215,9	-48,5	-0,3	+16066,7
	Condução	47,9	54,0	-11,3	295,4	349,4	-15,5	-67,9	-84,6	-19,7
Dili	Radiação	12,1	52,3	-76,9	47,5	208,6	-77,2	-6,3	-29,7	-78,8
	Convecção	51,4	21,4	+140,2	186,4	66,7	+179,5	-9,9	-	-
	Condução	63,2	72,3	-12,6	233,7	274,2	-14,8	-16,2	-23,7	-31,6

Da análise do Quadro anterior, realça-se que a inclusão adicional de ITRBE sob as mantas de 8 cm de lã de rocha, provoca a diminuição significativa (na ordem dos 78%) dos fluxos de calor, médios e máximos, por radiação, a diminuição menos relevante dos fluxos de calor por condução e um aumento muito significativo dos fluxos de calor médios e máximos descendentes por convecção.

8.4.5 LÃ DE ROCHA COM 8 CM DE ESPESSURA POR BAIXO DE ITRBE COM PÓ, AMBOS SOB AS VERTENTES DA COBERTURA

Neste cenário a ideia é verificar, para o período de máximas temperaturas do ar exterior, qual a vantagem em se colocar o ITRBE, considerando a deposição de pó e sujidades, por cima das mantas de lã de rocha com 8 cm de espessura, aplicados sob as vertentes da cobertura, mantendo a caixa de ar entre esta e o isolamento, ou seja, analisar se a colocação conjunta destes dois tipos de isolamento, e na posição indicada, é ou não significativamente melhor do que colocar somente sob a cobertura 8 cm de lã de rocha (cenário 8.4.3).

Assim, ao analisar-se os resultados da temperatura operativa do quarto, verificou-se que este cenário 8.4.5 não originou diferenças de assinalar face ao uso isolado de mantas de lã de rocha com 8 cm de espessura. Em termos de temperaturas operativas médias os valores são exatamente iguais em todas as localidades. Em termos de temperaturas operativas máximas do quarto as reduções são para todas as localidades de somente 0,1°C. Em relação à temperatura do teto do quarto, a colocação adicional de ITRBE sobre as mantas de 8 cm de espessura de lã de rocha, provocou que a temperatura média do teto do quarto sofresse um ligeiro abaixamento de 0,1°C na Maia, em Beja e em Dili, sendo que nas restantes duas localidades os valores mantiveram-se inalterados e em relação às temperaturas máximas do teto do quarto, estas decresceram 0,2°C em todas as localidades.

Comparando estes resultados com os do cenário 8.4.4, pode-se dizer que existindo mantas de lã de rocha de 8 cm de espessura sob as vertentes é, no respeitante à temperatura superficial do teto, mais vantajoso aplicar cumulativamente ITRBE por cima da lã de rocha do que por baixo (ao contrário do que acontece quando a análise é relativa à temperatura operativa do quarto).

De forma, a se analisar com mais pormenor, a diferença de comportamento dos cenários 8.4.5 e 8.4.3 (só lã de rocha com 8 cm de espessura sob as vertentes da cobertura), apresentam-se no Quadro 8.94 as variações dos respetivos valores dos fluxos de calor através da totalidade da cobertura (ao mesmo tempo teto do quarto).

Quadro 8.94

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.5 FACE AO 8.4.3, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Cobertura -> Quarto (cenário 8.4.5 face ao 8.4.3)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.4.5 (W)	8.4.3 (W)	ΔW (%)	8.4.5 (W)	8.4.3 (W)	ΔW (%)	8.4.5 (W)	8.4.3 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	43,6	46,9	-7,0	206,6	221,8	-6,9	-80,0	-85,0	-5,9
	Convecção	24,2	26,3	-8,0	63,1	71,4	-11,6	-	-	-
	Condução	65,1	70,6	-7,8	263,7	287,6	-8,3	-75,8	-83,3	-9,0
Maia	Radiação	27,4	29,7	-7,7	200,9	215,6	-6,8	-80,2	-85,2	-5,9
	Convecção	20,4	21,9	-6,8	58,3	66,8	-12,7	-	-	-
	Condução	45,6	49,4	-7,7	255,6	278,9	-8,4	-77,5	-85,0	-8,8
Beja	Radiação	38,3	41,2	-7,0	233,2	249,6	-6,6	-101,5	-107,7	-5,8
	Convecção	22,2	24,1	-7,9	53,7	63,0	-14,8	-	-	-
	Condução	58,2	63,0	-7,6	283,9	309,7	-8,3	-96,7	-106,1	-8,9
Petroliña	Radiação	34,6	37,1	-6,7	258,5	277,0	-6,7	-82,7	-87,9	-5,9
	Convecção	16,9	18,5	-8,6	63,0	73,7	-14,5	-0,5	-0,3	66,7
	Condução	50,0	54,0	-7,4	320,0	349,4	-8,4	-77,0	-84,6	-9,0
Dili	Radiação	48,9	52,3	-6,5	194,3	208,6	-6,9	-27,6	-29,7	-7,1
	Convecção	19,3	21,4	-9,8	58,2	66,7	-12,7	-	-	-
	Condução	66,8	72,3	-7,6	251,3	274,2	-8,4	-20,8	-23,7	-12,2

Da análise do Quadro anterior, realça-se que a inclusão adicional de ITRBE sobre as mantas de 8 cm de lã de rocha provoca a diminuição (embora não muito significativa) dos fluxos de calor, médios e máximos, de todos os tipos de transmissão de calor, com exceção do fluxo de calor máximo ascendente por convecção, que aumentou significativamente percentualmente, embora muito pouco em termos absolutos.

Comparando estes resultados com os do cenário 8.4.4, pode-se dizer que existindo mantas de lã de rocha de 8 cm de espessura sob as vertentes é mais vantajoso, sob o ponto de vista da transferência de calor por radiação e condução aplicar cumulativamente ITRBE por baixo da lã de rocha do que por cima. Só na transferência de calor por convecção é que a aplicação de ITRBE por cima dos 8 cm de lã de rocha é que resultou mais benéfica no sentido de que os fluxos de calor são menores neste caso. Considerando os valores conjuntos relativos às três

formas de transferência de calor, pode-se evidenciar de que é mais benéfico colocar o ITRBE sob a lã de rocha do que o colocar por cima desta.

Pode-se, assim, de uma forma geral, tendo em conta as temperaturas operativas do quarto e os fluxos de calor, recomendar que a colocação do ITRBE, tendo em conta a ação do pó, se faça sob as mantas de lã de rocha e não sobre. Obviamente que, nestes casos, é necessário ter em atenção o problema da difusão de vapor de água, sendo que a adoção de superfícies de alumínio perfuradas será de equacionar.

8.4.6 COM ITRBE DE MÁ QUALIDADE SOB AS VERTENTES DA COBERTURA

Como foi referido no Capítulo VII, no âmbito deste trabalho, fez-se a determinação experimental das emissividades de vários materiais, incluindo uma série de ITRBEs disponíveis no mercado. Como se constatou, alguns desses ITRBEs apresentaram valores das emissividades da sua superfície surpreendentemente elevados, colocando inclusivamente em causa a própria classificação de ITRBE. Recorde-se que a Legislação térmica em vigor (Direção Geral de Energia e Geologia, 2013_a), define uma superfície de baixa emissividade como sendo qualquer superfície com uma emissividade igual ou inferior a 0,2. Assim, para se analisar o efeito de se colocar estes materiais cuja emissividade não é tão baixa como o esperado, desenvolveu-se este cenário, em que se colocou um material com aparentes superfícies de baixa emissividade (que são de plástico aluminizado) a envolver uma camada interna de 5 mm de PEF, mas que nos ensaios, cujos resultados são apresentados no Capítulo VII, o valor encontrado para o ε das superfícies foi de 0,56, valor que por ser superior a 0,2 não poderá ser considerado, à luz da Legislação em vigor, como sendo de baixa emissividade. Alerta-se, igualmente, que este valor de emissividade igual a 0,56, com o passar do tempo, ainda seria maior, devido à natural deposição de pó e sujidades várias.

Deste modo, apresentam-se no Quadro 8.95, as variações do cenário 8.4.6 face ao 8.4.2, que compreende a aplicação de ITRBE com emissividade das superfícies de alumínio polido igual a 0,06, das temperaturas médias, máximas e mínimas da face exterior e interior (teto do quarto) da cobertura, no período de máxima temperatura do ar exterior.

Quadro 8.95

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS OPERATIVAS DO, CENÁRIO 8.4.6 FACE AO 8.4.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas operativas dos compartimentos (cenário 8.4.6 face ao 8.4.2)				
Local	Zona	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Quarto	+0,7	+1,5	+0,1
Maia	Quarto	+0,5	+1,3	-0,1
Beja	Quarto	+0,7	+1,6	0,0
Petrolina	Quarto	+0,6	+1,7	0,0
Dili	Quarto	+0,7	+1,5	+0,3

São, pois, evidentes as consequências negativas do uso de supostos ITRBEs, que apresentam valores altos da emissividade das suas superfícies. Verifica-se, que ao passar-se a emissividade das superfícies do ITRBE de 0,06 para 0,56, as temperaturas operativas médias do quarto aumentam entre 0,5°C e 0,7°C e as máximas entre 1,3°C e 1,7°C.

De seguida, e no Quadro 8.96, apresentam-se as variações, deste cenário 8.4.6 face ao 8.4.2, das temperaturas do teto do quarto.

Quadro 8.96

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DO TETO DO QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.6 FACE AO 8.4.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.4.6 face ao 8.4.2)				
Local	Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Teto do quarto	+0,2	-0,4	+0,7
Maia	Teto do quarto	+0,1	-0,5	+0,6
Beja	Teto do quarto	+0,2	-0,5	+0,7
Petrolina	Teto do quarto	+0,3	-0,6	+0,7
Dili	Teto do quarto	+0,2	-0,3	+0,4

Igualmente se verifica as consequências negativas do uso de supostos ITRBEs, que apresentam valores altos da emissividade das suas superfícies, pois as temperaturas médias do teto do quarto aumentam entre 0,1°C e 0,3°C, sendo que as máximas diminuem entre 0,3°C e 0,6°C e as mínimas aumentam entre 0,4°C e 0,7°C. Assinala-se a diminuição das temperaturas máximas pela utilização de superfícies do “ITRBE” com uma emissividade mais

alta, sendo que tal tem a ver com o facto de que dissipam mais calor para o quarto, baixando assim a temperatura da superfície inferior do material de “isolamento”.

No respeitante à análise da diferença de comportamento dos cenários 8.4.6 e 8.4.2, apresentam-se no Quadro 8.97 as variações dos respetivos valores dos fluxos de calor através da totalidade da cobertura (ao mesmo tempo teto do quarto).

Quadro 8.97
VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A COBERTURA E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.4.6
FACE AO 8.4.2, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Cobertura -> Quarto (cenário 8.4.6 face ao 8.4.2)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.4.6 (W)	8.4.2 (W)	ΔW (%)	8.4.6 (W)	8.4.2 (W)	ΔW (%)	8.4.6 (W)	8.4.2 (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	109,1	18,9	+477,2	547,0	88,2	+520,2	-205,4	-31,3	+556,2
	Convecção	92,4	111,4	-17,1	380,2	458,7	-17,1	-104,6	-130,5	-19,8
	Condução	199,0	130,0	+53,1	925,1	546,8	+69,2	-310,0	-161,9	+91,5
Maia	Radiação	74,1	12,6	+488,1	537,1	85,9	+525,3	-199,9	-31,3	+538,7
	Convecção	68,0	79,6	-14,6	374,8	447,2	-16,2	-103,4	-131,8	-21,5
	Condução	140,1	91,9	+52,4	907,7	532,3	+70,5	-303,3	-163,2	+85,8
Beja	Radiação	93,9	16,6	+465,7	601,6	97,3	+518,3	-255,4	-39,6	+544,9
	Convecção	81,9	99,1	-17,4	401,7	490,6	-18,1	-130,4	-165,1	-21,0
	Condução	173,7	115,3	+50,7	1001,0	587,7	+70,3	-385,8	-204,7	+88,5
Petroлина	Radiação	79,9	14,5	+451,0	680,5	109,6	+520,9	-210,7	-32,3	+552,3
	Convecção	66,8	83,2	-19,7	460,4	558,6	-17,6	-106,3	-132,9	-20,0
	Condução	145,2	97,5	+48,9	1138,7	668,0	+70,5	-316,9	-165,0	+92,1
Dili	Radiação	116,3	20,3	+472,9	518,3	83,7	+519,2	-86,5	-11,7	+639,3
	Convecção	90,1	111,7	-19,3	364,3	438,4	-16,9	-37,7	-43,6	-13,5
	Condução	205,0	131,9	+55,4	880,6	521,9	+68,7	-124,3	-55,4	+124,4

Da análise do Quadro anterior, realça-se que a colocação de “ITRBEs” com superfícies de emissividade de 0,56, face a 0,06, aumenta muito significativamente os fluxos de calor por radiação, em que os valores médios aumentam em mais de 400% e os valores máximos em mais de 500 %. Em relação aos fluxos de calor por convecção, existe um leve decréscimo quando se usam emissividades de 0,56 face a 0,06, sendo que tal tem a ver com o facto de que a temperatura do teto é mais baixa no primeiro cenário. Finalmente, e no que concerne aos fluxos de calor por condução, verifica-se que o uso de superfícies com emissividades de 0,56,

face às de 0,06, implicam um aumento dos valores médios na ordem dos 50%, dos valores máximos descendentes na ordem dos 70% e dos valores máximos ascendentes entre 85% (na Maia) e 124% (em Dili). Tendo em conta os valores conjuntos dos três fluxos para todas as localidades, é perfeitamente evidente o significativo acréscimo de fluxo de calor que o uso de “ITRBE” de baixa qualidade, com superfícies de emissividade exagerada, provoca.

8.5 ESTUDO DE VÁRIOS CENÁRIOS NO EDIFÍCIO COM COBERTURA EM TERRAÇO

Serão apresentados, de seguida, os resultados das simulações com o programa CAPSOL sobre o modelo base de edifício, mas com a diferença de que a cobertura em vez de ser de duas águas com desvão é uma cobertura em terraço.

A cobertura em terraço é constituída por uma laje aligeirada em betão com 16,5 cm de espessura, revestida inferiormente com estuque na espessura de 1,5 cm. Praticamente todas estas simulações foram realizadas para a localidade Portuguesa de Beja (com exceção de cenários para Montalegre no período de inverno), sendo que os resultados apresentados correspondem, na sua esmagadora maioria, ao período onde se atingiu maiores temperaturas no verão. Devido ao facto do quarto estar fechado e não possuir grelhas de ventilação foi considerado que a ventilação que ocorre neste compartimento é igual a 0,2 RPH.

.

8.5.1 EXISTÊNCIA DE TETO FALSO SEM QUALQUER TIPO DE ISOLAMENTO

Nesta simulação incluiu-se por debaixo da laje de cobertura horizontal, um teto falso em gesso cartonado de 1,3 cm de espessura, formando com a laje de cobertura, uma caixa de ar estanque de espessura igual a 10 cm. Superiormente, a laje de cobertura está revestida com uma tela asfáltica de cor negra com 1 mm de espessura e emissividade igual a 0,98. Neste cenário não existe qualquer isolamento térmico. As janelas possuem portadas interiores de alumínio lacadas a branco, que estão na posição de fechadas e não existe utilização do quarto,

provocando tal que se considerem nulos os ganhos internos. De seguida, na Figura 8.51, apresentam-se os resultados das temperaturas, nas zonas térmicas consideradas (exterior, caixa de ar do teto falso, quarto e restante zona interior da edificação), sendo que as temperaturas do quarto e da caixa de ar do teto falso são temperaturas operativas.

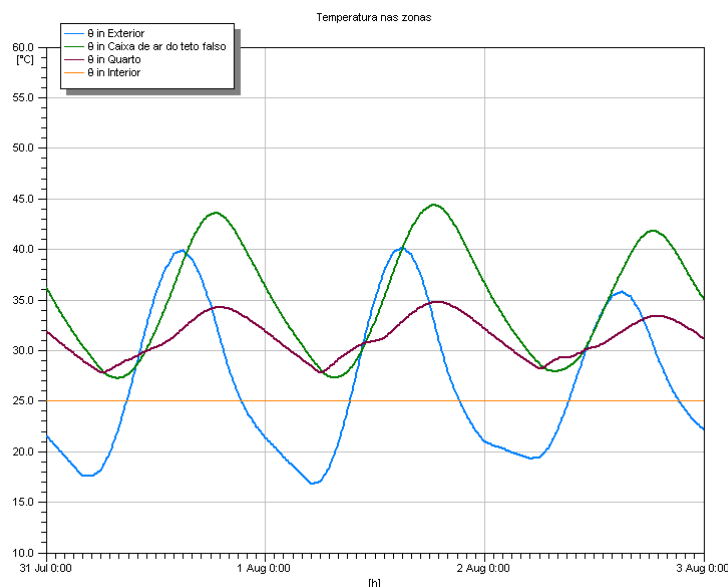


Figura 8.51
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.1 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

No Quadro 8.98 indicam-se os valores das temperaturas médias, máximas e mínimas atingidas no período em estudo.

Quadro 8.98
TEMPERATURAS OPERATIVAS E DO AR NO CENÁRIO 8.5.1, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Temperaturas operativas e do ar exterior			
Zona	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Exterior	26,9	40,2	16,8
Caixa de ar do teto falso	35,0	44,4	27,3
Quarto	31,2	34,8	27,8
Interior	25,0	25,0	25,0

Realça-se, pois, que a temperatura operativa do quarto apresenta valores médios e mínimos (sobretudo os últimos) superiores aos da temperatura exterior e valores máximos significativamente inferiores. É também relevante referir que a temperatura da caixa de ar apresenta valores médios, mínimos e máximos superiores à temperatura do ar exterior.

Na Figura 8.52 apresentam-se as temperaturas das superfícies envolventes do quarto.

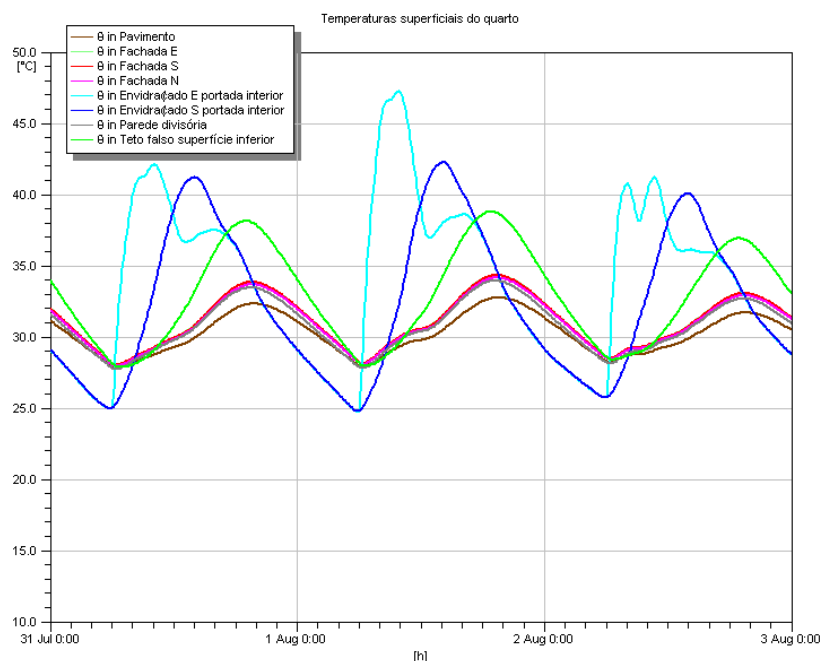


Figura 8.52

TEMPERATURAS DAS SUPERFÍCIES ENVOLVENTES DO QUARTO, PARA BEJA, NO CENÁRIO 8.5.1

É relevante apontar que são as superfícies interiores das portadas de alumínio que atingem a maior temperatura superficial no quarto, seguindo-se a do teto.

No Quadro 8.99, indicam-se os valores das temperaturas médias, máximas e mínimas superficiais nas faces exterior e interior da cobertura e nas faces superior e inferior do teto falso.

Quadro 8.99

TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DA COBERTURA E DO TETO FALSO NO CENÁRIO 8.5.1, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Temperaturas superficiais			
Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
	°C	°C	°C
Face exterior da cobertura	38,8	63,4	21,0
Face inferior do teto falso	32,8	38,8	27,9

Em relação aos valores dos fluxos de calor, pela totalidade do teto do quarto, estes são apresentados no Quadro 8.100, de quando da comparação deste cenário com o 8.5.2.

8.5.2 ITRBE POUSADO NO TETO FALSO

Neste cenário, a única diferença face à anterior, é que foi aplicado por cima do teto falso uma camada de isolamento térmico refletante de baixa emissividade (ITRBE) constituído por 5 mm de PEF (espuma de polietileno) revestido em ambas as faces por alumínio muito polido com emissividade e coeficiente de absorção de 0,06. Deste modo, apresentam-se na Figura 8.53, os resultados das temperaturas, nas zonas térmicas consideradas.

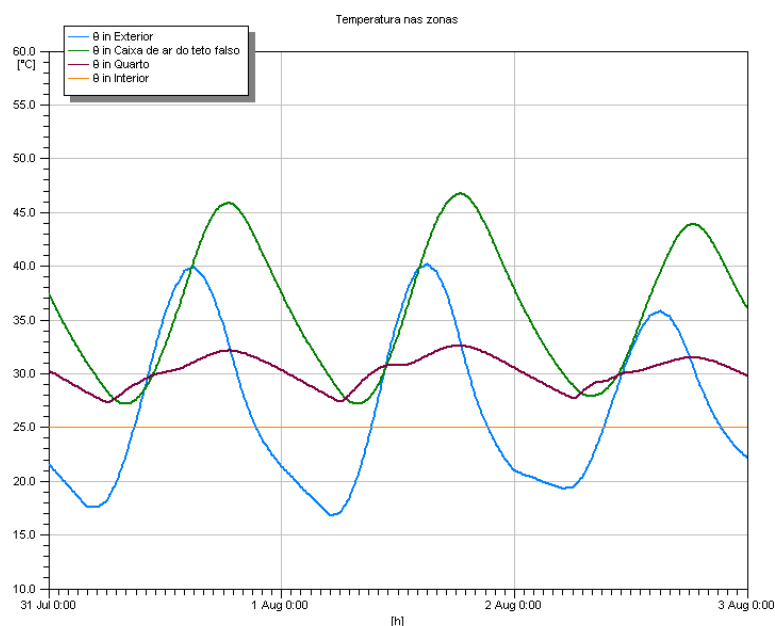
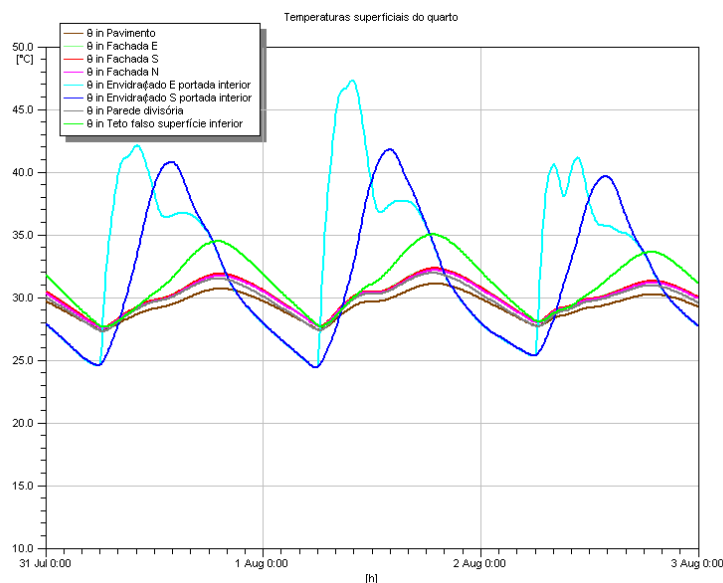


Figura 8.53
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.2 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

É, pois, evidente a diminuição da temperatura do quarto face à situação de não colocação de ITRBE (Figura 8.51 do cenário 8.5.1).

Verificou-se que, com a aplicação de ITRBE sobre o teto falso, a temperatura operativa média do quarto diminui 1,0°C, a máxima 2,2°C e a mínima 0,5°C e quanto à caixa de ar sobre o teto falso, as temperaturas médias e máximas aumentaram respetivamente 1,0 e 2,3°C.

Na Figura 8.54 apresentam-se os resultados das temperaturas das superfícies envolventes do quarto.

**Figura 8.54**

TEMPERATURAS DAS SUPERFÍCIES DO QUARTO NO CENÁRIO 8.5.2 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Evidencia-se a significativa diminuição da temperatura do teto do quarto, provocada pela colocação de ITRBE sobre o teto falso.

Verificou-se, igualmente, que com a aplicação de ITRBE, a temperatura média e máxima do teto do quarto reduziu-se, respetivamente, em 1,6 e 3,8°C. Quanto às temperaturas mínimas, situação referente ao período noturno, esta diminui somente 0,3°C.

Finalmente, apresentam-se no Quadro 8.100, as variações, do cenário 8.5.2 face ao 8.5.1, e para Beja, dos respetivos valores dos fluxos de calor através da totalidade do teto do quarto.

Quadro 8.100

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE O TETO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.2 FACE AO 8.5.1, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Teto do quarto -> Quarto (cenário 8.5.2 face ao 8.5.1)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.5.2 (W)	8.5.1 (W)	ΔW (%)	8.5.2 (W)	8.5.1 (W)	ΔW (%)	8.5.2 (W)	8.5.1 (W)	ΔW (%)
Beja	Radiação	103,9	161,8	-35,8	256,6	418,7	-38,7	-68,8	-103,7	-33,7
	Convecção	57,7	88,0	-34,4	134,6	217,5	-38,1	-25,7	-43,7	-41,2
	Condução	159,6	247,8	-35,6	387,9	636,8	-39,1	-89,4	-145,4	-38,5

Verifica-se, assim, que, com a aplicação de ITRBE sobre o teto falso, existiu uma significativa diminuição generalizada dos fluxos de radiação e de condução entre o teto falso e o quarto, atingindo-se reduções máximas na ordem dos 39% e médias na ordem dos 35%.

Verifica-se, ainda, que os fluxos de calor mais significativos, em valor absoluto, são os de condução, seguindo-se os de radiação e finalmente os de convecção.

De forma a verificar-se a influência estrita do alumínio polido, e como tal dos ITRBE, simulou-se ainda a mesma situação mas sem o uso dos 5 mm de PEF, ou seja, considerou-se o teto falso revestido superiormente unicamente por folha de alumínio de emissividade igual a 0,06. Analisando os resultados e comparando com os correspondentes do uso do ITRBE com o PEF face a não ter qualquer isolamento (cenário 8.5.1), evidencia-se que o alumínio polido, só por si, foi responsável pela diminuição de 0,8 dos 1°C que o conjunto alumínio e 5 mm de PEF conseguiu provocar na temperatura média operativa do quarto, ou seja 80% do total e foi responsável pela diminuição de 1,8 dos 2,2°C, ou seja 81,8%, da temperatura máxima operativa do mesmo quarto. Já quanto à temperatura superficial do teto, o alumínio polido foi em termos médios responsável pela diminuição de 1,3 do total de 1,6 °C, ou seja 81,3%, e em termos máximos responsável pela diminuição de 3,1 dos 3,8 °C, ou seja 81,6 % do total. Conclui-se, assim, que efetivamente o grande responsável, pelas diminuições das temperaturas operativas no quarto e da temperatura superficial do teto deste compartimento, foi o alumínio polido e não aos 5 mm de PEF. A mesma conclusão se pode tirar relativamente à diminuição dos fluxos médios de calor entre o teto do quarto e este compartimento, em que o alumínio foi responsável respetivamente por 80,7%; 81,4% e 81,2% do abaixamento total da radiação, convecção e condução, conseguido em relação ao cenário 8.5.1.

Outro estudo que se efetuou foi o de comparar a colocação do ITRBE sobre o teto falso com a de o aplicar na face inferior da laje da cobertura (face superior da caixa de ar entre a cobertura e o teto falso). Tendo em conta todos os resultados de temperaturas e fluxos de calor obtidos, pode-se concluir que é praticamente indiferente colocar o ITRBE nessas duas localizações, embora os resultados sejam levemente melhores para a segunda situação. No entanto, numa perspetiva de médio/longo prazo é igualmente recomendável a colocação do ITRBE na face superior da caixa de ar, pois deste modo o ITRBE fica muito menos sujeito à diminuição das

suas propriedades baixo emissivas devido ao facto de nesta posição a deposição de pó ser irrelevante, embora numa caixa de ar estanque a problemática do pó não ser premente.

8.5.3 ITRBE APLICADO A NÍVEL INTERMÉDIO NA CAIXA DE AR DO TETO FALSO

Neste cenário colocou-se o isolamento térmico refletante de baixa emissividade (ITRBE) num nível intermédio na caixa de ar do teto falso, nomeadamente abaixo 2,5 cm da laje de cobertura. Face à situação 8.5.2, verificou-se que a colocação de ITRBE a nível intermédio na caixa de ar do teto falso, implicou que a temperatura operativa no quarto reduzisse em termos médios 0,4°C, em termos máximos 0,6°C e mínimos 0,2°C. Já em relação à temperatura superficial do teto do quarto, reduziu-se em termos médios, máximos e mínimos, respetivamente, 0,5°C, 1,1°C e 0,1°C.

Finalmente, apresentam-se no Quadro 8.101, as variações do cenário 8.5.3 face ao 8.5.2, e para Beja, dos valores dos fluxos de calor através da totalidade do teto do quarto.

Quadro 8.101

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE O TETO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.3 FACE AO 8.5.2, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Teto do quarto -> Quarto (cenário 8.5.3 face ao 8.5.2)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.5.3 (W)	8.5.2 (W)	ΔW (%)	8.5.3 (W)	8.5.2 (W)	ΔW (%)	8.5.3 (W)	8.5.2 (W)	ΔW (%)
Beja	Radiação	85,0	103,9	-18,2	211,6	256,6	-17,5	-66,5	-68,8	-3,3
	Convecção	47,9	57,7	-17,0	112,0	134,6	-16,8	-24,9	-25,7	-3,1
	Condução	130,9	159,6	-18,0	319,2	387,9	-17,7	-86,4	-89,4	-3,4

Através da análise do Quadro anterior, verifica-se que, comparando o cenário 8.5.3 face ao 8.5.2, os fluxos de calor que se processam através do teto falso para o quarto, têm em termos médios uma diminuição que varia entre 17% (na convecção) e 18,2% (na radiação) e em termos máximos descendentes uma diminuição que varia entre 16,8% (na convecção) e 17,7% (na condução).

Deste modo, e tendo em conta todos os resultados de temperaturas e fluxos de calor, pode-se concluir que em tetos falsos estanques, a melhor posição do isolamento térmico refletante de baixa emissividade (ITRBE) é a posição intermédia. Não será alheio a estes resultados, o facto de que neste caso atuam duas (e não uma) superfícies de alumínio polidas de baixa emissividade e alta refletância.

8.5.4. LÃ DE ROCHA POUSADA EM CIMA DO TETO FALSO

Neste cenário aplicou-se lã de rocha com 4 cm de espessura por cima do teto falso, mantendo-se tudo o resto igual ao cenário anterior 8.5.3 (colocação do ITRBE a nível intermédio no teto falso). O objetivo é comparar a utilização de um isolamento térmico resistivo (lã de rocha) com a de um ITRBE colocado numa posição favorável (situação intermédia da caixa de ar).

Pelos resultados, verificou-se que a colocação de mantas de lã de rocha de 4 cm de espessura, implicou que a temperatura operativa no quarto reduzisse em termos médios e mínimos $0,1^{\circ}\text{C}$ e em termos máximos $0,3^{\circ}\text{C}$ e quanto à temperatura superficial do teto do quarto, esta reduziu-se em termos médios, máximos e mínimos, respetivamente, $0,3^{\circ}\text{C}$ e $0,5^{\circ}\text{C}$ e $0,2^{\circ}\text{C}$, ou seja, pode-se, assim, dizer que no respeitante ao conforto no quarto é praticamente indiferente colocar ITRBE a nível intermédio na caixa de ar ou colocar 4 cm de lã de rocha sobre o teto falso, embora este último cenário dê ligeiramente melhores resultados.

Finalmente, apresentam-se no Quadro 8.102, as variações do cenário 8.5.4 face ao 8.5.3, e para Beja, dos valores dos fluxos de calor através da totalidade do teto do quarto.

Quadro 8.102
VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE O TETO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.4 FACE AO 8.5.3, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Teto do quarto -> Quarto (cenário 8.5.4 face ao 8.5.3)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.5.4 (W)	8.5.3 (W)	ΔW (%)	8.5.4 (W)	8.5.3 (W)	ΔW (%)	8.5.4 (W)	8.5.3 (W)	ΔW (%)
Beja	Radiação	76,0	85,0	-10,6	187,0	211,6	-11,6	-60,3	-66,5	-9,3
	Convecção	43,1	47,9	-10,0	99,4	112,0	-11,3	-21,3	-24,9	-14,5
	Condução	117,2	130,9	-10,5	281,3	319,2	-11,9	-74,9	-86,4	-13,3

Verifica-se, assim, que, comparando o cenário 8.5.4 face ao 8.5.3, os fluxos de calor que se processam através do teto falso para o quarto, têm em termos médios, uma diminuição que varia entre 10% (na convecção) e 10,6% (na radiação) e em termos máximos descendentes uma diminuição que varia entre 11,3% (na convecção) e 11,9% (na condução). Verifica-se, pois, que em termos de fluxos de calor, a colocação dos 4 cm de lã de rocha sobre o teto falso é algo melhor do que a colocação de ITRBE a nível intermédio na caixa de ar do teto falso, embora a diferença não seja muito significativa.

Deste modo, e tendo em conta todos os resultados de temperaturas e fluxos de calor, pode-se concluir que em tetos falsos estanques, a colocação de 4 cm de lã de rocha sobre o teto falso é sempre melhor do que qualquer solução de ITRBE na caixa de ar do teto falso, sendo no entanto a diferença reduzida quando se coloca o ITRBE a nível intermédio na caixa de ar do teto falso.

8.5.5 APLICAÇÃO DE TELA COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE NA SUPERFÍCIE SUPERIOR DA COBERTURA HORIZONTAL

Neste cenário colocou-se na face superior da cobertura horizontal um revestimento de alumínio polido de emissividade igual a 0,03 (valor medido experimentalmente e apresentado no Capítulo VII), mantendo a nível inferior o teto falso estanque sem qualquer isolante térmico, ou seja tal e qual o cenário 8.5.1. Desta comparação resultou que a temperatura operativa no quarto reduzisse em termos dos seus valores médios, mínimos e máximos, respetivamente 3,2°C, 2,2°C e 5,2°C e quanto à temperatura superficial do teto do quarto, esta reduziu-se em termos médios, mínimos e máximos, respetivamente, 4,9°C, 2,6°C e 8,5°C, ou seja, pode-se, assim, dizer que no respeitante ao conforto no quarto é muito relevante a aplicação da tela com o referido revestimento refletante de baixa emissividade. Também não é menos relevante a diminuição extremamente relevante da temperatura superficial externa da cobertura em terraço em que a adoção deste cenário 8.5.5 implicou uma diminuição de 11,4°C na temperatura média, 26,6°C na temperatura máxima e 1,4°C na temperatura mínima. Obviamente que não será negligenciável a futura deposição de pó e outras sujidades na superfície de baixa emissividade em causa, sendo essencial a respetiva limpeza periódica.

Já no Quadro 8.103, apresentam-se as variações do cenário 8.5.5 face ao 8.5.1, e para Beja, dos respetivos valores dos fluxos de calor através da totalidade do teto do quarto.

Quadro 8.103
VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE O TETO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.5 FACE AO 8.5.1, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Teto do quarto -> Quarto (cenário 8.5.5 face ao 8.5.1)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.5.5 (W)	8.5.1 (W)	ΔW (%)	8.5.5 (W)	8.5.1 (W)	ΔW (%)	8.5.5 (W)	8.5.1 (W)	ΔW (%)
Beja	Radiação	-15,0	161,8	*	96,5	418,7	-77,0	-169,5	-103,7	+63,5
	Convecção	-4,5	88,0	*	53,3	217,5	-75,5	-82,5	-43,7	+88,8
	Condução	-21,3	247,8	*	146,5	636,8	-77,0	-253,4	-145,4	+74,3

* Inversão do sentido do fluxo de calor.

É, assim, evidente a diminuição extremamente relevante dos fluxos de calor por radiação, convecção e condução que o cenário 8.5.5 provoca em relação ao 8.5.1, chegando-se a diminuições do fluxo máximo de calor do teto para o respetivo quarto de 77,0% para a radiação, de 75,5% para a convecção e de 77% para a condução. Já no respeitante aos fluxos de calor médios, constata-se inclusivamente que existe inversão de fluxo para todas as formas de transmissão de calor, ou seja enquanto que no cenário 8.5.1 o fluxo médio é descendente, no cenário 8.5.5 o fluxo médio é ascendente, pois neste caso os fluxos ascendentes, originados sobretudo em período noturno, são superiores aos fluxos descendentes, desenvolvidos, em especial, em período diurno.

Comparou-se, de seguida, os resultados deste cenário 8.5.5 com os do cenário 8.5.4 (em que se colocou mantas de lã de rocha de 4 cm de espessura sobre o teto falso). Desta comparação, resultou que a temperatura operativa no quarto reduzisse em termos dos seus valores médios, mínimos e máximos, respetivamente 1,7°C, 1,4°C e 2,1°C e quanto à temperatura superficial do teto do quarto, esta reduziu-se em termos médios, mínimos e máximos, respetivamente, 2,5°C, 2,0°C e 3,1°C, ou seja, pode-se, assim, dizer, que no respeitante ao conforto no quarto a colocação de revestimento refletante de baixa emissividade na superfície exterior da laje de cobertura permite a obtenção de temperaturas operativas e temperaturas superficiais mais baixas, do que com a colocação sobre o teto falso de mantas de lã de rocha de 4 cm de

espessura. As diferenças atingem até valores com algum significado, como é o caso da temperatura operativa máxima do quarto e da temperatura máxima do seu teto.

Já no Quadro 8.104 apresentam-se as variações, do cenário 8.5.5 face ao 8.5.4, e para Beja, dos respetivos valores dos fluxos de calor através da totalidade do teto do quarto.

Quadro 8.104
VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE O TETO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.5 FACE AO 8.5.4, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Teto do quarto -> Quarto (cenário 8.5.5 face ao 8.5.4)										
Local	Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
		8.5.5 (W)	8.5.4 (W)	ΔW (%)	8.5.5 (W)	8.5.4 (W)	ΔW (%)	8.5.5 (W)	8.5.4 (W)	ΔW (%)
Beja	Radiação	-15,0	76,0	*	96,5	187,0	-48,4	-169,5	-60,3	+181,1
	Convecção	-4,5	43,1	*	53,3	99,4	-46,4	-82,5	-21,3	+287,3
	Condução	-21,3	117,2	*	146,5	281,3	-47,9	-253,4	-74,9	+238,3

* Inversão do sentido do fluxo de calor.

É pois evidente a diminuição extremamente relevante dos fluxos de calor que o cenário 8.5.5 provoca em relação ao 8.5.4, chegando-se a diminuições do fluxo máximo de calor do teto para o respetivo quarto na ordem dos 50%. Já no respeitante aos fluxos de calor médios, constata-se inclusivamente que existe inversão de fluxo para todas as formas de transmissão de calor, estando relacionado com isto, o facto de que, em 8.5.5, o fluxo ascendente máximo aumentou.

Pode-se, assim, concluir que, tendo em conta os resultados dos fluxos de calor, bem como das temperaturas, que o cenário 8.5.5 tem um melhor comportamento no período de máximas temperaturas anuais, do que o cenário 8.5.4.

8.5.6 APLICAÇÃO DE PORTADAS INTERIORES COM REVESTIMENTO REFLETANTE DE BAIXA EMISSIVIDADE NA SUA SUPERFÍCIE EXTERIOR

Neste cenário, a única diferença face ao anterior é a utilização, nas portadas interiores das janelas, de um revestimento de baixa emissividade (0,03) das suas superfícies exteriores (do lado da lâmina de ar entre a portada e o vidro). O objetivo é verificar qual o impacto desta

medida em relação à utilização das portadas de alumínio interiores iniciais (sem revestimentos de baixa emissividade), das quais já se constatou, de que devido ao efeito estufa criado entre a portada e o vidro, provocam elevadas temperaturas superficiais nas portadas.

Na Figura 8.55 apresentam-se os resultados das temperaturas das superfícies envolventes do quarto para este cenário 8.5.6 .

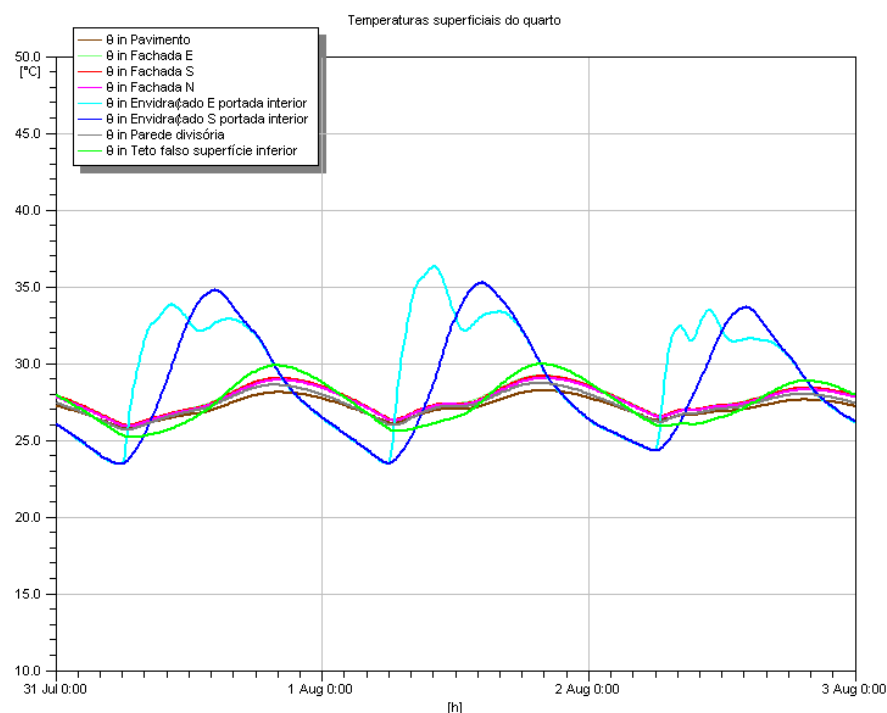


Figura 8.55
TEMPERATURAS DAS SUPERFÍCIES DO QUARTO NO CENÁRIO 8.5.6 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Verifica-se pela análise destes gráficos, que em especial a temperatura superficial das portadas decresceu bastante com a utilização de um revestimento refletante de baixa emissividade aplicado na superfície do lado exterior das portadas. Enquanto nos cenários anteriores, como é o caso do anterior, em que a temperatura máxima atingida nas portadas é sensivelmente de 46°C, verifica-se que com o revestimento ITRBE na portada (cenário 8.5.6) essa temperatura máxima é de aproximadamente 36°C (ver Figura 8.55), ou seja menos 10°C, o que é bastante relevante. É importante, igualmente, realçar que esta alteração nas portadas provocou, face ao cenário anterior, uma diminuição de 0,5°C tanto na temperatura operativa média como máxima do quarto, não existindo alteração na temperatura mínima, sendo assim mais um resultado que justifica o uso das portadas refletantes de baixa emissividade.

8.5.7 APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DE BAIXA EMISSIVIDADE NA SUPERFÍCIE EXTERIOR DAS FACHADAS

Neste cenário, a única diferença face ao anterior (8.5.6) é que as fachadas são revestidas exteriormente por uma superfície refletante de baixa emissividade (0,06), constituída, por exemplo, por placas revestidas a alumínio. Da análise dos resultados, infere-se que com o uso do revestimento refletante de baixa emissividade na superfície exterior da fachada, a temperatura operativa média, máxima e mínima do quarto é reduzida em respetivamente 0,4; 0,5 e 0,4°C. No respeitante às temperaturas superficiais da fachada sul, estas sofrem uma redução, com especial relevância na sua superfície exterior, que apresenta abaixamentos da temperatura média, máxima e mínima, respetivamente em 1,8°C, 3,8°C e 0,7°C e quanto à superfície interior da fachada sul, o abaixamento da temperatura média, máxima e mínima foi de respetivamente 0,6°C; 0,7°C e 0,6°C.

Já no Quadro 8.105, apresentam-se as variações, do cenário 8.5.7 face ao 8.5.6, e para Beja, dos respetivos valores dos fluxos de calor entre a superfície interior da fachada sul e o quarto.

Quadro 8.105

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A FACHADA SUL E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.7 FACE AO 8.5.6, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor da fachada sul para o quarto (cenário 8.5.7 face ao 8.5.6)										
Local	Fluxo	Fluxo médio			Fluxo máximo no sentido do exterior			Fluxo máximo no sentido do interior		
		8.5.7 (W)	8.5.6 (W)	ΔW (%)	8.5.7 (W)	8.5.6 (W)	ΔW (%)	8.5.7 (W)	8.5.6 (W)	ΔW (%)
Beja	Radiação	0,8	9,1	-91,2	-15,4	-7,5	+105,3	17,8	25,5	-30,2
	Convecção	0,9	4,9	-81,6	-10,4	-6,8	+52,9	11,2	15,0	-25,3
	Condução	0,5	12,8	-96,1	-23,5	-12,2	+92,6	25,8	37,2	-30,6

Da análise do Quadro anterior infere-se que, com o uso do revestimento refletante de baixa emissividade na superfície exterior da fachada, existem reduções muito significativas dos fluxos médios que circulam da superfície interior da fachada para o quarto, chegando-se a reduções de 96,1 % no respeitante ao fluxo por condução. Quanto aos fluxos máximos no sentido da superfície interior da fachada para o quarto, as reduções já são algo menores, chegando-se, no que concerne ao fluxo por condução, a valores de menos 30,6%. Finalmente

e no respeitante aos fluxos máximos no sentido do quarto para a superfície interior da fachada (situação típica do período noturno) verifica-se, neste caso, que existem incrementos significativos quando se aplica o revestimento exterior refletante de baixa emissividade, chegando-se a aumentos de 105,3% no que concerne ao fluxo por radiação, isto porque à noite, e nesta situação, o diferencial de temperaturas entre o quarto e a superfície interior da fachada é maior (notar que a temperatura mínima do quarto decresce menos que a temperatura mínima da superfície interior da fachada sul). Por tudo o que foi referido é evidente a vantagem, nas condições deste estudo, de se aplicar uma superfície refletante de baixa emissividade na superfície exterior das fachadas. Caberá à indústria desenvolver os melhores produtos para este efeito.

8.5.8 APLICAÇÃO DE ITRBE EM POSIÇÃO INTERMÉDIA NA CAIXA DE AR DE UMA PAREDE DUPLA

8.5.8.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

Neste cenário, a única diferença face ao anterior (8.5.7) é que as fachadas foram substituídas por alvenaria dupla de tijolo cerâmico com 15 cm de espessura cada, revestidas exteriormente e interiormente com reboco tradicional de 1,5 cm de espessura, sendo que entre os tijolos existe uma caixa de ar de 8 cm de espessura, em que no seu interior e exatamente a meio da sua espessura, foi colocado um ITRBE constituído por 0,5 cm de espessura de PEF revestido em ambas as faces por alumínio polido com emissividade igual a 0,06. O objetivo é comparar o funcionamento deste cenário com o que integra os mesmos elementos construtivos e materiais, com a exceção de que dentro da caixa de ar não se encontra o ITRBE mas sim lâ de rocha de 4 cm de espessura aplicado na face exterior do pano interior da parede dupla (considerado cenário 8.5.8 inicial – 8.5.8i).

Da análise dos resultados, infere-se que com o uso do ITRBE na caixa de ar da fachada, a temperatura operativa do quarto e as superficiais da fachada sul praticamente mantêm-se inalteradas (somente apresentam em alguns casos ligeiras diminuições entre 0,1 e 0,2°C). Já no Quadro 8.106 apresentam-se as variações do cenário 8.5.8 face ao 8.5.8 inicial, e para Beja, dos valores dos fluxos de calor, através da totalidade da fachada sul.

Quadro 8.106

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A FACHADA SUL E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.8 FACE AO 8.5.8 INICIAL, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor da fachada sul para o quarto (cenário 8.5.8 face ao 8.5.8 inicial)										
Local	Fluxo	Fluxo médio			Fluxo máximo no sentido do exterior			Fluxo máximo no sentido do interior		
		8.5.8 (W)	8.5.8 i (W)	ΔW (%)	8.5.8 (W)	8.5.8 i (W)	ΔW (%)	8.5.8 (W)	8.5.8 i (W)	ΔW (%)
Beja	Radiação	5,5	7,2	-23,6	-25,8	-26,1	-1,1	40,0	43,1	-7,2
	Convecção	3,6	4,6	-21,7	-15,8	-16,2	-2,5	24,4	26,1	-6,5
	Condução	7,9	10,6	-25,5	-37,7	-37,8	-0,3	59,0	63,0	-6,3

Verifica-se, assim, que se obtêm, com o cenário 8.5.8, melhores resultados, sendo que em termos médios obtêm-se reduções que oscilam entre 21,7% e 25,5%. Deste modo, e tendo igualmente em conta os resultados das temperaturas obtidas, pode-se dizer que, para as condições consideradas, existe vantagem em colocar o ITRBE no meio da caixa de ar da fachada, em relação a colocar os 4 cm de lã de rocha encostados ao pano interior.

8.5.8.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

Para se analisar como este tipo de solução se comporta em períodos mais frios, realizou-se um estudo similar ao anterior, mas desta vez aplicado a Montalegre, referente ao período de mínimas temperaturas exteriores. Pelos resultados das temperaturas obtidas, ficou patente que as diferenças entre os dois cenários são nulas ou praticamente nulas (reduções máximas de 0,1°C). Já no Quadro 8.107 apresentam-se as variações dos valores dos fluxos de calor através da totalidade da fachada sul.

Quadro 8.107

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A FACHADA SUL E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.8 FACE AO 8.5.8 INIC., E PARA MONTALEGRE, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor da fachada sul para o quarto (cenário 8.5.8 face ao 8.5.8 inicial)										
Local	Fluxo	Fluxo médio			Fluxo máximo no sentido do exterior			Fluxo máximo no sentido do interior		
		8.5.8 (W)	8.5.8i (W)	ΔW (%)	8.5.8 (W)	8.5.8i (W)	ΔW (%)	8.5.8 (W)	8.5.8i (W)	ΔW (%)
Montalegre	Radiação	-1,8	-0,9	+100,0	-14,5	-12,7	+14,2	13,6	14,7	-7,5
	Convecção	-1,1	-0,6	+83,3	-9,3	-8,3	+12,0	8,3	8,9	-6,7
	Condução	-3,7	-2,2	+68,2	-24,3	-20,5	+18,5	18,5	20,7	-10,6

Da análise do Quadro anterior (e do resultado das temperaturas) infere-se que, em períodos de menores temperaturas exteriores, com o uso de ITRBE na caixa de ar da parede dupla de fachada, obtêm-se piores resultados do que a colocação de 4 cm de lã de rocha encostados ao pano interior, sendo que em termos médios obtêm-se incrementos que oscilam entre 68,2% e 100,0%, ou seja, pode-se concluir que o uso de ITRBE é mais benéfico no verão mas menos interessante no inverno.

8.5.9 IMPACTO DA ABERTURA DAS PORTADAS DAS JANELAS

Neste cenário, a única diferença face ao 8.5.7 (cobertura em terraço com revestimento exterior em alumínio polido de emissividade igual a 0,03, janelas fechadas com portadas interiores ativadas apresentando revestimento exterior com emissividade igual a 0,03 e fachada com revestimento exterior de emissividade igual a 0,06) é que as portadas de alumínio interiores em vez de estarem na posição de ativadas, ou seja a obturarem cada uma das duas janelas, estão, por oposição, completamente abertas.

Na Figura 8.56, apresentam-se, para este cenário os resultados das temperaturas, nas zonas térmicas consideradas.

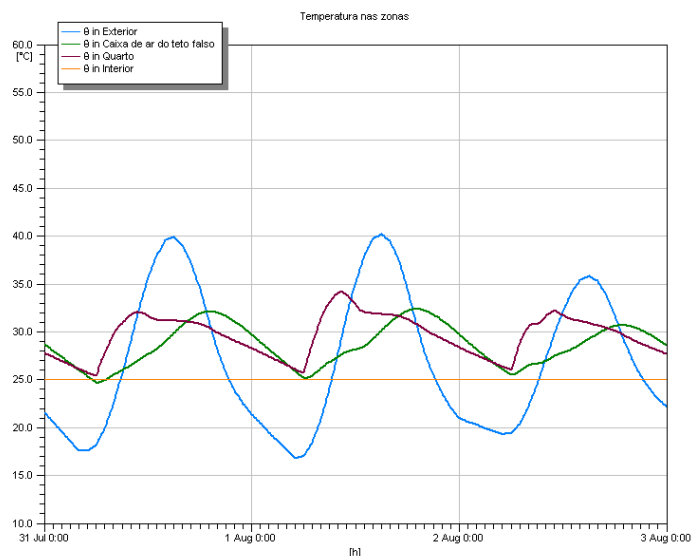


Figura 8.56
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.9 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Pela análise do gráfico da Figura anterior, verificou-se a maior temperatura ocorrida no quarto (inclusivamente em alguns períodos, superior à da caixa de ar do teto falso) bem como a sua maior irregularidade, devido à possibilidade de entrada direta da radiação solar pelos envidraçados. Comparando as temperaturas médias, máximas e mínimas operativas do quarto, entre os dois cenários (8.5.9 e 8.5.7) verifica-se que existiram incrementos dos seus valores de respetivamente 2,5°C; 5,6°C e 0,2°C. Em relação à temperatura superficial interior da fachada sul, constata-se que, com a abertura das janelas, os valores médios e máximos aumentam respetivamente em 1,1°C e 2,4°C e os mínimos diminuem 0,8°C.

Já no Quadro 8.108, apresentam-se as variações, em percentagem, do cenário 8.5.9 face ao 8.5.7, e para Beja, dos respetivos valores dos fluxos de calor, transmitidos pela totalidade do envidraçado sul (com portada no cenário 8.5.7 e vidro no cenário 8.5.9).

Quadro 8.108

VARIAÇÕES DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE O ENVIDRAÇADO SUL E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.9 FACE AO 8.5.7, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor do envidraçado sul para o quarto (cenário 8.5.9 face ao 8.5.7)										
Local	Fluxo	Fluxo médio			Fluxo máximo no sentido do exterior			Fluxo máximo no sentido do interior		
		8.5.9 (W)	8.5.7 (W)	ΔW (%)	8.5.9 (W)	8.5.7 (W)	ΔW (%)	8.5.9 (W)	8.5.7 (W)	ΔW (%)
Beja	Radiação	-0,5	5,4	*	-15,5	-11,1	+39,6	24,4	34,3	-28,9
	Convecção	-0,8	2,9	*	-10,8	-5,5	+96,4	12,5	17,5	-28,6
	Condução	-1,7	8,5	*	-26,3	-16,7	+57,5	36,5	52,8	-30,9

*Inversão de sentido do fluxo de calor

Pela análise do Quadro anterior, pode-se constatar que com a abertura das portadas, que possuem baixa emissividade na sua superfície do lado exterior, os fluxos máximos no sentido do quarto para o exterior (correspondendo a instantes do período noturno), aumentam. Quanto aos fluxos de calor do exterior para o quarto (correspondendo a instantes do período diurno), estes diminuem com a abertura das portadas, pois neste caso o diferencial de temperatura entre a face interior do envidraçado e o quarto é maior (o dobro) com as portadas ativadas ($35-28,6 = 6,4^{\circ}\text{C}$) do que com estas abertas ($37,4-34,2 = 3,2^{\circ}\text{C}$). É relevante, igualmente, apontar a alteração do sentido do fluxo médio entre o envidraçado sul e o quarto, que com as

portadas ativadas é do exterior para o interior, mas que com as portadas abertas é exatamente ao contrário, ou seja, do interior para o exterior.

De forma a verificar se a vantagem de se incluir isolamento ITRBE, como revestimento exterior da cobertura em terraço e das fachadas, se mantém, na mesma ordem de grandeza, caso as janelas possuam as portadas abertas, realizou-se, ainda, uma simulação em que tudo é igual ao cenário 8.5.1 (sem qualquer tipo de isolamento) mas com as portadas abertas (p.a.), sendo que se designou este cenário por 8.5.1 p.a. .

A ideia é analisar os diferenciais verificados entre os cenários 8.5.9 e o 8.5.1 p.a. (com e sem ITRBE na situação de portadas abertas) e depois comparar com os diferenciais verificados entre os cenários 8.5.7 e o 8.5.1p.f.0,03 (com e sem ITRBE na situação de portadas fechadas, portadas essas que apresentam, na sua superfície orientada para o exterior, revestimento de emissividade igual a 0,03). Em relação às variações, deste cenário 8.5.9 face ao 8.5.1 p.a., resultou que existiram diminuições das temperaturas operativas médias, máximas e mínimas do quarto, respetivamente em 3,5°C; 2,6°C e 2,5°C.

Já em relação às variações entre os cenários 8.5.7 e 8.5.1p.f.0,03 das mesmas temperaturas operativas médias, máximas e mínimas do quarto, estas resultaram respetivamente em diminuições de 3,6°C, 5,7°C e 2,5°C.

Da análise dos resultados anteriores, conclui-se que com as portadas abertas, o impacto, na temperatura operativa do quarto, de colocar ITRBE a revestir exteriormente a cobertura em terraço e a fachada, se faz sentir menos (abaixamentos máximos de 2,6°C e médios de 3,5°C) do que quando as portadas estão fechadas (abaixamentos máximos de 5,7°C e médios de 3,6°C), realçando-se de que, como em termos de temperaturas médias, a diferença entre os dois diferenciais é irrelevante (0,1°C), é, deste modo, nas temperaturas máximas que o ter ou não as portadas ativadas se faz mais sentir.

8.5.10 ISOLAMENTO PELO EXTERIOR DAS FACHADAS E COBERTURA ALTERNADAMENTE COM MATERIAL RESISTIVO E COM ITRBE

8.5.10.1 Período de Máximas Temperaturas Exteriores

Considerou-se, agora, igualmente para Beja, na cobertura e nas fachadas, o uso conjunto, de exclusivamente isolamento resistivo pelo exterior, ou seja, nestes elementos construtivos não existe cumulativamente o uso de ITRBEs. Assim, foi considerado que as fachadas, constituídas por 32 cm de espessura em granito, rebocadas pelo interior, possuem a nível exterior, isolamento térmico de EPS com 4 cm de espessura (sistema ETICS), revestido por reboco exterior. Quanto à cobertura em terraço, esta foi considerada constituída por laje aligeirada com 16,5 cm de espessura, revestida inferiormente com estuque e superiormente com tela asfáltica, protegida com isolamento térmico XPS com 4 cm de espessura, por sua vez revestido superiormente com um reboco hidráulico. Finalmente, e no que concerne aos envidraçados, foi considerado que estes são constituídos por vidro duplo incolor 6 + 4 mm com portadas exteriores ativadas, sendo que estas portadas apresentam um revestimento exterior com emissividade igual a 0,03.

O objetivo da consideração deste cenário é o de permitir comparar com o uso conjunto, na cobertura e nas fachadas (sendo que quanto às portadas foi usada a mesma solução nos dois cenários), de ITRBE aplicado pelo exterior, sendo que neste cenário (nomeado de 8.5.7 p.e. 0,03, pois que a única diferença em relação ao cenário 8.5.7 é que as portadas são aplicadas pelo exterior e têm a sua superfície exterior revestidas com ITRBE de emissividade igual a 0,03), as fachadas e a cobertura têm a mesma constituição utilizada no cenário 8.5.7 (fachadas, constituídas por 32 cm de espessura em granito, rebocadas pelo exterior e pelo interior, que possuem a nível exterior um revestimento com emissividade de 0,06). Quanto à cobertura em terraço, esta foi considerada constituída por laje aligeirada com 16,5 cm de espessura, revestida inferiormente com estuque e superiormente com tela asfáltica com revestimento superior em alumínio com emissividade igual a 0,03.

Assim, apresentam-se de seguida, nas Figuras 8.57 e 8.58, os gráficos, referentes respetivamente ao cenário 8.5.10 e 8.5.7 p.e.0,03, com os resultados das temperaturas, nas 4

zonas térmicas consideradas, sendo que são temperaturas operativas as do quarto e da caixa de ar do teto falso.

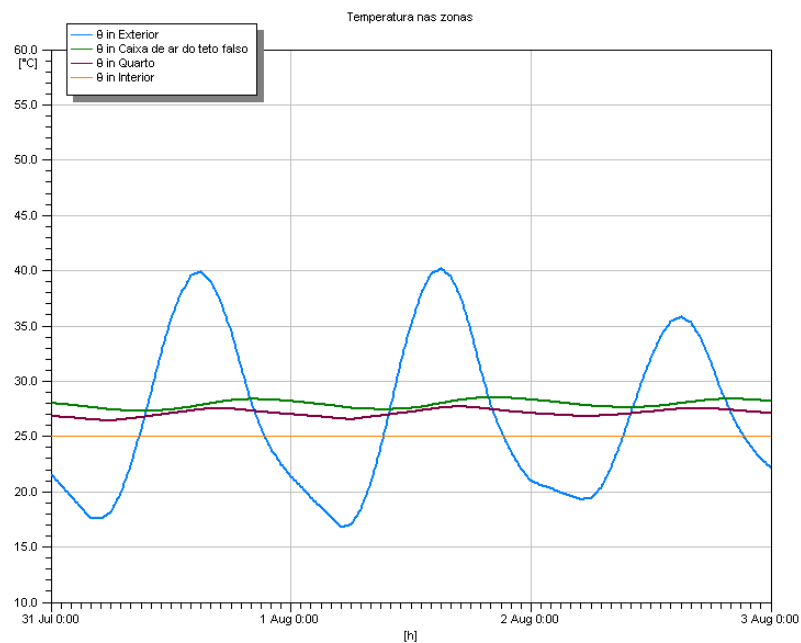


Figura 8.57
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.10 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

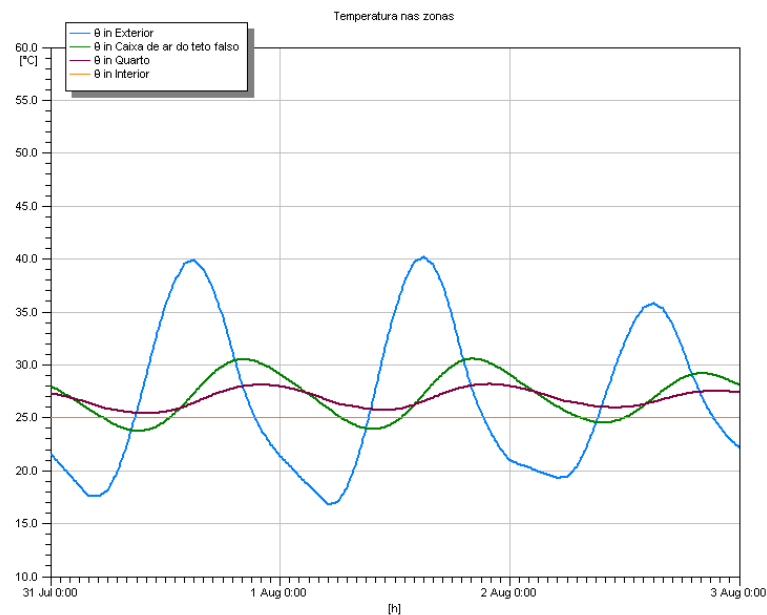


Figura 8.58
TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.7 P.E.0,03 E PARA BEJA NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Pela análise das duas Figuras anteriores, conclui-se que a aplicação de isolamento resistivo com 4 cm de espessura, face à aplicação de ITRBE, ambos pelo exterior das fachadas e cobertura, implica que as temperaturas operativas do quarto e da caixa de ar do teto falso tenham uma menor amplitude térmica, atingindo menores valores máximos e maiores valores mínimos. Em termos de temperaturas operativas do quarto, a colocação de isolamento resistivo (cenário 8.5.10) provocou face ao ITRBE (cenário 8.5.7 p.e.0,03) um aumento de 0,3°C e 1,0°C, respetivamente do valor médio e mínimo e uma diminuição de 0,5°C do valor máximo.

De seguida, no Quadro 8.109, indicam-se as variações, deste cenário 8.5.10 face ao 8.5.7 p.e.0,03, no que concerne às temperaturas superficiais da cobertura, do teto falso, da fachada sul e da portada da janela sul, no período de máxima temperatura exterior.

Quadro 8.109
VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS, DO CENÁRIO 8.5.10 FACE AO 8.5.7 P.E.0,03, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (8.5.10 face a 8.5.7 p.e.0,03)				
Local	Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Beja	Face exterior da cobertura	+4,6	+16,0	-2,2
	Face inferior do teto falso	+0,6	-1,1	+2,2
	Face interior da fachada S	+0,2	-1,1	+1,6
	Face exterior da fachada S	+1,8	+10,9	-3,7
	Face interior da portada S	+0,2	+0,8	+0,1

Pela análise do Quadro anterior, verifica-se que o uso de isolamentos resistivos, com 4 cm de espessura, face à aplicação de ITRBEs, ambos pelo exterior, em termos médios, provoca temperaturas superficiais sempre maiores, como é o caso da face exterior da cobertura, com mais 4,6°C, e da face inferior do teto falso, com mais 0,6°C.

Já no respeitante às temperaturas máximas, verifica-se que todas as superficiais exteriores são bem maiores na situação de isolamento resistivo do que de ITRBEs. Em relação às temperaturas máximas de superfícies interiores do quarto, estas são menores com o uso de isolamento térmico resistivo, com exceção da face interior da portada do envidraçado a sul que é maior em 0,8°C do que com a aplicação de ITRBEs. Quanto às temperaturas mínimas

superficiais interiores, verifica-se que com a aplicação de isolamentos resistivos, as mesmas são superiores à situação de aplicação de ITRBEs.

Já no Quadro 8.110, apresentam-se as variações do cenário 8.5.10 face ao 8.5.7 p.e.0,03, e para Beja, dos respetivos valores dos fluxos de calor através da totalidade do teto do quarto.

Quadro 8.110

VARIAÇÕES DOS FLUXO DE CALOR ENTRE O TETO FALSO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.10 FACE AO 8.5.7 P.E.0,03, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Teto do quarto -> Quarto (cenário 8.5.10 face a 8.5.7 p.e.0,03)									
Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
	8.5.10 (W)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.10 (W)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.10 (W)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)
Radiação	36,0	10,5	+242,9	50,6	110,6	-54,2	*	-76,4	*
Convecção	19,2	6,1	+214,8	32,3	57,4	-43,7	*	-42,0	*
Condução	53,4	14,8	+260,8	80,8	170,4	-52,6	*	-127,0	*

* No cenário 8.5.10 não existe fluxo ascendente.

Verifica-se, assim, que em termos de fluxos médios de calor (que são descendentes), a inclusão de ITRBEs provocou valores mais baixos (chegando-se a menos 260,8% no fluxo por condução do teto para o quarto) do que a inclusão de isolamento resistivo, não sendo alheio a este facto a inexistência de fluxos de calor ascendentes na situação de aplicação destes isolamentos.

Já em termos de valores máximos dos fluxos de calor (descendentes), aconteceu exactamente o contrário, ou seja, a inclusão de ITRBEs provocaram fluxos de valor superior (chegando a mais 54,2 % no fluxo por radiação do teto para o quarto) do que na situação de aplicação de isolamento resistivo.

A seguir, no Quadro 8.111, apresentam-se as variações do cenário 8.5.10 face ao 8.5.7 p.e. 0,03, e para Beja, dos respetivos valores dos fluxos de calor através da totalidade da fachada sul.

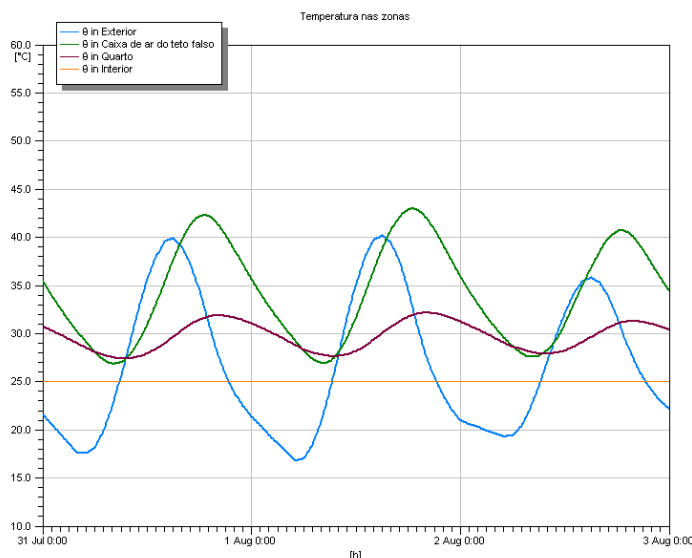
Quadro 8.111

VARIAÇÕES DOS FLUXO DE CALOR ENTRE A FACHADA SUL E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.10 FACE AO 8.5.7 P.E.0,03, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor da fachada sul para o quarto (cenário 8.5.10 face a 8.5.7 p.e.0,03)									
Fluxo	Fluxo médio			Fluxo máximo no sentido do exterior			Fluxo máximo no sentido do interior		
	8.5.10 (W)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.10 (W)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.10 (W)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)
Radiação	4,7	9,6	-51,0	-19,6	-30,5	-35,7	25,9	42,0	-38,3
Convecção	2,8	4,5	-37,8	-13,4	-18,3	-26,8	16,6	22,8	-27,2
Condução	6,4	13,0	-50,8	-32,6	-39,9	-18,3	41,3	55,7	-25,9

Verifica-se, assim, que todos os valores são sempre inferiores com o uso do isolamento resistivo do que com o ITRBE, chegando-se a diminuições de 51% no fluxo médio por radiação. É pois evidente, de que em termos de fluxos de calor, o uso de ITRBE tem mais eficiência em coberturas do que em fachadas.

De forma a se verificar claramente o efeito do uso de ITRBEs pela superfície exterior das fachadas e cobertura do edifício (cenário 8.5.7 p.e. 0,03) comparou-se, para Beja, este cenário com o de não colocação de qualquer isolamento térmico, mantendo-se, no entanto, e unicamente, ativadas as portadas exteriores revestidas por fora com material de emissividade igual a 0,03 (designando-se este por cenário 8.5.1. p.e. 0,03). Assim, apresentam-se, na Figura 8.59 os resultados das temperaturas, nas 4 zonas térmicas consideradas.

**Figura 8.59**

TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.1 P.E.0,03 PARA BEJA E NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Pela comparação com a Figura 8.58 relativa ao gráfico homólogo respeitante ao cenário 8.5.7 p.e. 0,03, é evidente que o uso de ITRBEs diminui de uma forma vincada as temperaturas operativas tanto do quarto como da caixa de ar do teto falso. As variações, do cenário 8.5.7 p.e.0,03 face ao 8.5.1 p.e.0,03, no que concerne às temperaturas operativas médias, máximas e mínimas do quarto foi de respetivamente uma diminuição de 2,9°C; 3,9°C e 2,0°C.

De seguida, no Quadro 8.112, indicam-se as variações, do cenário 8.5.7 p.e.0,03 face ao 8.5.1 p.e.0,03, no que concerne às temperaturas superficiais da cobertura, do teto falso, da fachada sul e da portada da janela sul, no período de máxima temperatura exterior.

Quadro 8.112

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS, DO CENÁRIO 8.5.7 P.E. 0,03 FACE AO 8.5.1 P.E. 0,03, E PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (8.5.7 p.e 0,03 face a 8.5.1 p.e.0,03)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Beja	Face exterior da cobertura	-11,4	-26,6	-1,4
	Face inferior do teto falso	-4,7	-7,5	-2,6
	Face interior da fachada S	-2,5	-3,1	-2,0
	Face exterior da fachada S	-2,0	-4,0	-0,8
	Face interior da portada S	-2,0	-2,7	-1,4

Também, sob o ponto de vista das temperaturas superficiais, é evidente a contribuição da aplicação de ITRBEs, na diminuição acentuada dos respetivos valores. Evidencia-se a diminuição muito acentuada da temperatura superficial exterior da cobertura. A diminuição de 7,5°C e 4,7°C, respetivamente na temperatura máxima e média do teto do quarto e a diminuição de 3,1°C e 2,5°C, respetivamente na temperatura máxima e média da superfície interior da fachada sul, são também, de extremo relevo, contribuindo, tal, de forma significativa para o conforto interior no quarto.

Já no Quadro 8.113 apresentam-se as variações do cenário 8.5.7 p.e.0,03 face ao 8.5.1 p.e.0,03, e para Beja, dos respetivos valores dos fluxos de calor através da totalidade do teto falso.

Quadro 8.113

VARIAÇÕES DOS FLUXO DE CALOR ENTRE O TETO FALSO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.7 P.E.0,03 FACE AO 8.5.1 P.E.0,03, PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Teto do quarto -> Quarto (cenário 8.5.7 p.e. 0,03 face a 8.5.1 p.e.0,03)									
Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
	8.5.7 p.e. 0,03 (W)	8.5.1 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.7 p.e. 0,03 (W)	8.5.1 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.7 p.e. 0,03 (W)	8.5.1 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)
Radiação	10,5	196,2	-94,6	110,6	485,9	-77,2	-76,4	-34,5	+121,4
Convecção	6,1	102,4	-94,0	57,4	243,4	-76,4	-42,0	-12,8	+228,1
Condução	14,8	296,7	-95,0	170,4	734,4	-76,8	-127,0	-59,1	+114,9

Verifica-se que em termos de fluxos de calor médios e máximos descendentes, a inclusão de ITRBEs provocou valores substancialmente mais baixos (chegando-se a menos 95% no fluxo médio por condução e a menos 77,2% no fluxo máximo descendente por radiação, ambos no sentido do teto para o quarto) do que sem qualquer isolamento nas paredes e cobertura. Já em termos de valores máximos dos fluxos de calor ascendentes, aconteceu exactamente o contrário, ou seja, a inclusão de ITRBEs provocaram fluxos de valor superior (chegando a mais 228,1 % no fluxo por convecção do quarto para o respetivo teto) do que na situação de sem aplicação de qualquer isolamento nas paredes e cobertura.

A seguir, no Quadro 8.114, apresentam-se as variações do cenário 8.5.7 p.e.0,03 face ao 8.5.1 p.e.0,03, e para Beja, dos valores dos fluxos de calor através da totalidade da fachada sul.

Quadro 8.114

VARIAÇÕES DO FLUXO DE CALOR ENTRE A FACHADA SUL E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.7 P.E.0,03 FACE AO 8.5.1 P.E.0,03, PARA BEJA, NO PERÍODO DE MÁXIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor da fachada sul para o quarto (cenário 8.5.7 p.e. 0,03 face a 8.5.1 p.e.0,03)									
Fluxo	Fluxo médio			Fluxo máximo no sentido do exterior			Fluxo máximo no sentido do interior		
	8.5.7 p.e. 0,03 (W)	8.5.1 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.7 p.e. 0,03 (W)	8.5.1 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.7 p.e. 0,03 (W)	8.5.1 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)
Radiação	9,6	-16,5	*	-30,5	-102,0	-70,1	42,0	48,3	-13,0
Convecção	4,5	-3,5	*	-18,3	-43,6	-58,0	22,8	27,0	-15,6
Condução	13,0	-21,3	*	-39,9	-129,7	-69,2	55,7	63,0	-11,6

*Inversão de sentido do fluxo de calor

Constata-se, assim, que o uso de ITRBEs provoca em termos médios a alteração do sentido dos fluxos de calor, sendo que se passa do sentido do quarto para a fachada sul, no caso de não terem as paredes e coberturas qualquer isolante, para o sentido da fachada sul para o

quarto no caso do uso de ITRBEs pelo exterior (cenário 8.5.7. p.e. 0,03). No respeitante aos fluxos máximos no sentido do exterior, constata-se que, com o uso de ITRBE, face a não existir qualquer isolamento, a diminuição (que atinge o valor de menos 70,1% no fluxo por radiação) é mais significativa do que no que concerne aos fluxos máximos no sentido do interior (que atinge o valor de menos 15,6% no fluxo por convecção).

8.5.10.2 Período de Mínimas Temperaturas Exteriores

Fez-se o mesmo estudo, igualmente, em período de mínimas temperaturas exteriores anuais. Assim, apresentam-se nas Figuras 8.60 e 8.61, as temperaturas referentes respetivamente ao cenário 8.5.10 e 8.5.7 p.e.0,03, para Montalegre, nas zonas térmicas consideradas.

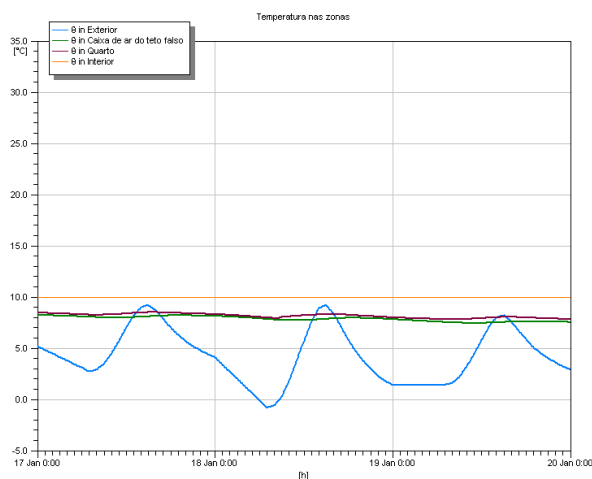


Figura 8.60

TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.10 PARA MONTALEGRE E NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

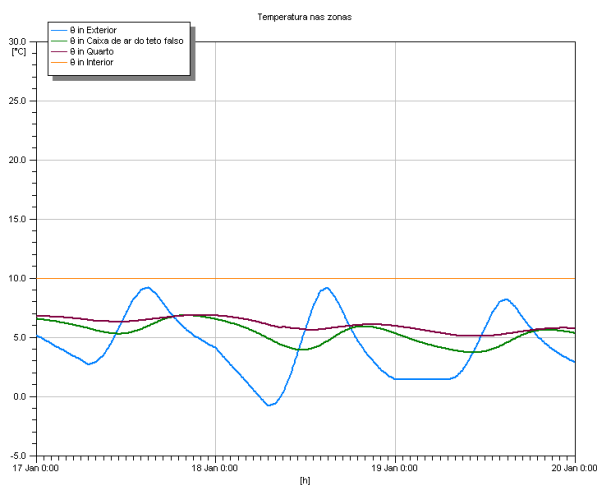


Figura 8.61

TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.7 P.E.0,03 PARA MONTALEGRE E NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Conclui-se, assim, que a aplicação de isolamento resistivo com 4 cm de espessura, face à aplicação de ITRBE, ambos pelo exterior, implica que as temperaturas operativas do quarto e da caixa de ar do teto falso tenham uma menor amplitude térmica e ao mesmo tempo atinjam valores mais elevados. Evidenciou-se de que a aplicação de isolamento resistivo com 4 cm de espessura, face à de ITRBE, ambos pelo exterior, provoca uma temperatura média, máxima e mínima do quarto mais alta respetivamente em 2,1°C; 1,6°C e 2,7°C. De seguida, no Quadro 8.115, indicam-se as variações, deste cenário 8.5.10 face ao 8.5.7 p.e.0,03, no que concerne às temperaturas superficiais da cobertura, do teto falso, da fachada sul e da portada da janela sul.

Quadro 8.115

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS, DO CENÁRIO 8.5.10 FACE AO 8.5.7 P.E.0,03, E PARA MONTALEGRE, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (8.5.10 face a 8.5.7 p.e.0,03)				
Local	Superfície	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
		°C	°C	°C
Montalegre	Face exterior da cobertura	+1,0	+5,6	-1,2
	Face inferior do teto falso	+2,3	+1,6	+3,2
	Face interior da fachada S	+2,6	+1,9	+3,3
	Face exterior da fachada S	+1,2	+9,1	-2,1
	Face interior da portada S	+1,5	+1,4	+1,4

Verifica-se, assim, que o uso de isolamentos resistivos com 4 cm de espessura, face à aplicação de ITRBEs, ambos pelo exterior, em termos médios, provoca temperaturas superficiais sempre maiores. Já nos Quadro 8.116, apresentam-se as variações, do cenário 8.5.10 face ao 8.5.7 p.e.0,03, e para Montalegre, dos respetivos valores dos fluxos de calor através da totalidade do teto falso.

Quadro 8.116

VARIAÇÕES DO FLUXO DE CALOR ENTRE O TETO FALSO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.10 FACE AO 8.5.7 P.E.0,03, PARA MONTALEGRE, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Teto do quarto -> Quarto (cenário 8.5.10 face a 8.5.7 p.e.0,03)									
Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
	8.5.10 (W)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.10 (W)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.10 (W)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)
Radiação	-13,5	-27,9	-51,6	-	2,7	*	-20,7	-70,4	-70,6
Convecção	-5,4	-17,3	-68,8	1,3	-	**	-12,9	-41,1	-68,6
Condução	-19,7	-46,1	-57,3	-	2,0	*	-33,6	-118,0	-71,5

* Não existe fluxo descendente em 8.5.10.

** Não existe fluxo descendente em 8.5.7 p.e.0,03

Verifica-se, assim, que em termos de fluxos médios de calor, a inclusão de isolamento resistivo pelo exterior, provocou valores mais baixos (chegando-se a menos 51,6%, 68,8% e 57,3%, respetivamente no fluxo por radiação, convecção e condução) do que no cenário do uso de ITRBE também pelo exterior, não sendo alheio a este facto a inexistência (ou a existência com valores muito baixos) de fluxos de calor descendentes na situação de aplicação de isolamentos resistivos. Quanto aos valores máximos dos fluxos de calor (ascendentes), a inclusão de ITRBEs provocaram fluxos de valor superior (chegando-se a mais 71,5 % no fluxo por condução) do que na situação de aplicação de isolamento resistivo.

A seguir, no Quadro 8.117, apresentam-se as variações do cenário 8.5.10 face ao 8.5.7 p.e. 0,03, e para Montalegre, no período de menores temperaturas exteriores, dos respetivos valores dos fluxos de calor através da totalidade da fachada sul.

Quadro 8.117

VARIAÇÕES DO FLUXO DE CALOR ENTRE A FACHADA SUL E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.10 FACE AO 8.5.7 P.E.0,03, PARA MONTALEGRE, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor da fachada sul para o quarto (cenário 8.5.10 face a 8.5.7 p.e.0,03)									
Fluxo	Fluxo médio			Fluxo máximo no sentido do exterior			Fluxo máximo no sentido do interior		
	8.5.10 (W)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.10 (W)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.10 (W)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)
Radiação	-0,3	-22,7	-98,7	-9,7	-40,1	-75,8	8,8	-	*
Convecção	0,6	-11,3	-105,3	-5,7	-21,1	-73,0	6,8	-	*
Condução	-0,3	-34,9	-99,1	-15,6	-59,0	-73,6	14,8	-	*

* Não existe fluxo no sentido do interior em 8.5.7 p.e. 0,03

Através da análise do Quadro anterior, conclui-se que, no que concerne aos fluxos de calor horizontais através da fachada sul, de que todos os valores médios e máximos, são sempre substancialmente inferiores com o uso de isolamento resistivo de 4 cm de espessura do que com ITRBEs, chegando-se a diminuições de 99,1% no respeitante ao fluxo médio por condução. É relevante referir que estas diminuições são maiores do que as ocorridas no caso de fluxos verticais através da cobertura.

De forma a se verificar, no período das menores temperaturas exteriores, claramente o efeito do uso de ITRBEs pela superfície exterior das fachadas e cobertura do edifício (cenário 8.5.7 p.e. 0,03) apresentam-se em seguida, e igualmente para Montalegre, comparações deste cenário com o de não colocação de qualquer isolamento térmico nos mesmos elementos

opacos, mantendo-se, no entanto, e unicamente, ativadas as portadas exteriores revestidas por fora com material de emissividade igual a 0,03 (designando-se este por cenário 8.5.1. p.e. 0,03). Assim, apresenta-se, de seguida, na Figura 8.62, o gráfico, referente ao cenário 8.5.1. p.e. 0,03, com os resultados das temperaturas, nas zonas térmicas consideradas.

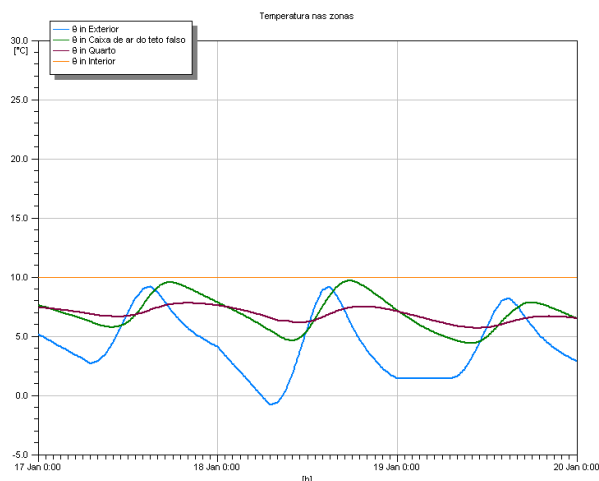


Figura 8.62

TEMPERATURAS NO CENÁRIO 8.5.1 P.E.0,03 PARA MONTALEGRE E NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Pela comparação com a Figura 8.61 relativa ao gráfico homólogo respeitante ao cenário 8.5.7 p.e. 0,03, é evidente que o uso de ITRBEs diminui as temperaturas operativas tanto do quarto como da caixa de ar do teto, isto devido sobretudo ao facto de que o ITRBE provocou a diminuição dos ganhos solares através dos elementos construtivos em que está aplicado. Constatou-se que a colocação do ITRBE, provocou uma temperatura operativa média, máxima e mínima do quarto mais baixa respetivamente em 0,8°C; 0,9°C e 0,6°C. De seguida, no Quadro 8.118, indicam-se as variações, do cenário 8.5.7 p.e.0,03 face ao 8.5.1 p.e.0,03, no que concerne às temperaturas superficiais da cobertura, do teto falso, da fachada sul e da portada da janela sul, no período de mínima temperatura exterior.

Quadro 8.118

VARIAÇÕES DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS, DO CENÁRIO 8.5.7 P.E. 0,03 FACE AO 8.5.1 P.E. 0,03, E PARA MONTALEGRE, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações das temperaturas superficiais (cenário 8.5.7 p.e.0,03 face a 8.5.1 p.e.0,03)				
Local	Superfície	Temperatura média °C	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Montalegre	Face exterior da cobertura	-2,5	-8,9	-0,2
	Face inferior do teto falso	-1,2	-1,7	-0,7
	Face interior da fachada S	-1,1	-1,1	-0,9
	Face exterior da fachada S	-1,3	-4,7	-0,3
	Face interior da portada S	-0,6	-0,5	-0,3

Também, sob o ponto de vista das temperaturas superficiais, é evidente que com a aplicação de ITRBEs pelo exterior, existe diminuição dos respetivos valores. Evidencia-se a diminuição de 1,7°C e 1,2°C, respetivamente na temperatura máxima e média do teto do quarto.

Já no Quadro 8.119, apresentam-se as variações do cenário 8.5.7 p.e.0,03 face ao 8.5.1 p.e.0,03, e para Montalegre, dos respetivos valores dos fluxos de calor através da totalidade do teto falso.

Quadro 8.119

VARIAÇÕES DOS FLUXO DE CALOR ENTRE O TETO FALSO E O QUARTO, DO CENÁRIO 8.5.7 P.E.0,03 FACE AO 8.5.1 P.E.0,03, PARA MONTALEGRE, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor: Teto do quarto -> Quarto (cenário 8.5.7 p.e.0,03 face a 8.5.1 p.e.0,03)									
Sentido de fluxo	Fluxo médio			Fluxo descendente máximo			Fluxo ascendente máximo		
	8.5.7 p.e.0,03 (W)	8.5.1 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	8.5.1 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	8.5.1 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)
Radiação	-27,9	7,5	*	2,7	101,7	-97,3	-70,4	-63,9	10,2
Convecção	-17,3	1,9	*	-	48,0	**	-41,1	-34,5	19,1
Condução	-46,1	8,5	*	2,0	151,8	-98,7	-118,0	-105,8	11,5

* Inversão de sentido de fluxo de calor; ** Não existe fluxo descendente em 8.5.7 p.e. 0,03

Verifica-se que, em termos de fluxos de calor médios, a inclusão de ITRBEs pelo exterior provocou fluxos ascendentes, enquanto que sem qualquer isolamento ocorreram fluxos descendentes, não sendo alheio a este facto a constatação de que com ITRBE os fluxos descendentes ou são muito baixos ou até não existem. Quanto aos fluxos máximos ascendentes estes são um pouco maiores com ITRBE do que sem qualquer isolamento. A seguir, no Quadro 8.120, apresentam-se as variações do cenário 8.5.7 p.e.0,03 face ao 8.5.1 p.e.0,03, e para Montalegre, dos valores dos fluxos de calor para a totalidade da fachada sul .

Quadro 8.120

VARIAÇÕES DO FLUXO DE CALOR ENTRE A FACHADA SUL, DO CENÁRIO 8.5.7 P.E.0,03 FACE AO 8.5.1 P.E.0,03, PARA MONTALEGRE, NO PERÍODO DE MÍNIMA TEMPERATURA EXTERIOR

Variações dos fluxos de calor da fachada sul para o quarto (cenário 8.5.7 p.e.0,03 face a 8.5.1 p.e.0,03)									
Fluxo	Fluxo médio			Fluxo máximo no sentido do exterior			Fluxo máximo no sentido do interior		
	8.5.7 p.e.0,03 (W)	8.5.1 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	8.5.1 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)	8.5.7 p.e.0,03 (W)	8.5.1 p.e.0,03 (W)	ΔW (%)
Radiação	-22,7	-9,2	+146,7	-40,1	-34,0	+17,9	-	15,5	*
Convecção	-11,3	-4,4	+156,8	-21,1	-16,8	+25,6	-	7,9	*
Condução	-34,9	-14,4	+142,4	-59,0	-46,2	+27,7	-	19,5	*

* Não existe fluxo no sentido do interior em 8.5.7 p.e. 0,03

Constata-se, assim, que o uso de ITRBEs pelo exterior das paredes e cobertura, provoca em termos médios, fluxos de calor no sentido do exterior, significativamente superiores aos correspondentes à situação de sem qualquer isolamento térmico, não sendo tal alheio à constatação de que não existem fluxos no sentido do interior na situação com ITRBEs.

No respeitante aos fluxos máximos no sentido do exterior, constata-se que, com o uso de ITRBE, face a não existir qualquer isolamento, existe um aumento, que atinge o valor de mais 27,7% no fluxo por condução.

Da comparação entre o período de máximas temperaturas exteriores (Beja) e mínimas temperaturas exteriores (Montalegre), concluiu-se que o uso de ITRBE pelo exterior das coberturas e fachadas, tem impacto mais positivo no conforto térmico no primeiro período referido. Basta para tal verificar que por exemplo no respeitante ao período das máximas temperaturas exteriores, existem vários parâmetros (exemplo: temperaturas máximas) que provocam melhores resultados com o uso do ITRBE pelo exterior, do que a aplicação de material de isolamento resistivo também pelo exterior.

Em relação à comparação com a situação de não existência de qualquer isolamento é inequívoco que a aplicação de ITRBE pelo exterior dá, no período de máximas temperaturas exteriores, melhores resultados em todos os parâmetros estudados. Já no período das temperaturas mínimas exteriores, verifica-se que o uso do ITRBE pelo exterior é sempre, e de uma forma significativa, mais desvantajoso do que o uso de material resistivo também pelo exterior. Inclusivamente, também se verificou, que vários parâmetros dão resultados mais desfavoráveis no cenário do uso de ITRBE pelo exterior do que sem qualquer isolamento, sobretudo devido ao facto de que o ITRBE minora de forma significativa os ganhos solares através dos elementos construtivos em que está aplicado.

É sempre importante recordar que nestas simulações foi considerado que o ITRBE no exterior não está afetado por pó e sujidades várias, pois que, neste caso, como já foi abordado em simulações anteriores, o comportamento dos ITRBEs seria grandemente afetado.

8.6 NOTAS FINAIS SOBRE AS SIMULAÇÕES EFETUADAS

É relevante referir, de que o problema das condensações devido à colocação de revestimentos de alumínio polido, que poderão funcionar como barreiras para-vapor, não foi alvo de análise no presente trabalho, não sendo, assim, por exemplo, investigado o funcionamento da perfuração das folhas de alumínio de modo a que os ITRBEs possam ser permeáveis à difusão do vapor, metodologia esta que vem abordada por alguns autores indicados no Capítulo IV. Também é importante ressaltar que, muitas das soluções testadas podem não cumprir a regulamentação térmica em vigor, pois que foram usadas estas soluções unicamente como termo de comparação e de análise de sensibilidade.

CAPÍTULO IX

CONCLUSÕES

9.1 NOTA INTRODUTÓRIA

A seguir é apresentada uma síntese das principais conclusões retiradas dos trabalhos realizados ao longo do presente estudo, tanto a nível dos ensaios efetuados num edifício à escala real, como das simulações numéricas empreendidas com recurso ao *software* CAPSOL. Os trabalhos realizados levantaram naturalmente algumas questões e pistas para futuros estudos. Assim, num parágrafo final serão apresentadas algumas propostas de possíveis desenvolvimentos futuros decorrentes do trabalho agora concluído.

9.2 CONCLUSÕES RELATIVAS ÀS MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

9.2.1 DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

De seguida, serão enumeradas as conclusões principais retiradas dos trabalhos experimentais desenvolvidos na moradia à escala real, situada na cidade da Maia, Portugal, e para períodos do ano em que as temperaturas do ar exterior atingem valores elevados:

- O uso de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade, cumulativamente com isolamentos resistivos, é vantajoso para atenuar a temperatura máxima no interior das habitações bem como o fluxo de calor que atravessa as respetivas coberturas, sobretudo nos dias mais quentes e com maior incidência da radiação solar;
- A atenuação dos valores máximos da temperatura no interior dos desvãos de cobertura é substancialmente mais evidente do que nos compartimentos que se situam por baixo daqueles, podendo pois a aplicação de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade, obviamente com as necessárias adaptações em relação à aplicação efetuada nos ensaios empreendidos no âmbito do presente trabalho, ser muito eficiente quando existam aproveitamentos dos referidos desvãos para funções úteis de ocupação humana;
- É patente, na situação do uso de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade em coberturas, comparativamente à situação sem qualquer isolamento, a reduzida variabilidade

da temperatura do ar bem como a menor temperatura máxima, que ocorrem nos compartimentos existentes por baixo dos respetivos desvãos, embora as diferenças em alguns períodos não sejam muito significativas, pois outros parâmetros influem na temperatura desses compartimentos, como sejam o tipo e área de vãos envidraçados, o regime de abertura dos mesmos, os ganhos internos de calor, entre outros;

- A vantagem do uso dos isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade, no que diz respeito à atenuação das temperaturas em termos médios diários, já não é tão evidente para o clima da região do Grande Porto, pois nestas médias entra sempre o período noturno. Obviamente que em termos de médias diárias diurnas a diferença já é mais significativa;

- Os valores máximos, em valor absoluto, dos fluxos de calor, que atravessaram as esteiras, e que são descendentes, atingem o maior valor nos desvãos sem isolamento térmico refletante de baixa emissividade, sendo que o uso, no desvão respetivo, desses isolamentos, permite uma diminuição desse valor. Já no respeitante aos valores mínimos, em valor absoluto, dos fluxos de calor, que no clima do Grande Porto são ascendentes, verifica-se que os mais elevados em valor absoluto ocorrem igualmente nos desvãos sem isolamentos térmicos refletante de baixa emissividade, sendo que o uso desses isolamentos, permite uma diminuição desse valor. Estes resultados são indicativos, que no caso de se instalarem equipamentos de refrigeração nos compartimentos, aqueles tendencialmente, necessitarão de menores potências térmicas instaladas, se superiormente à laje de esteira se aplicar isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade. No entanto, alerta-se para que durante a noite, nos períodos em que os compartimentos, como os quartos, atingem temperaturas mais elevadas do que no desvão de cobertura, os isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade limitam igualmente o fluxo de calor ascendente, o que no caso de não existir no quarto uma boa ventilação noturna, pode provocar, em alguns períodos, temperaturas elevadas que provocam desconforto nos ocupantes;

- A aplicação de isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade, além de na laje de esteira, também nas vertentes, por debaixo das telhas, traz vantagens pois a temperatura máxima atingida no desvão, assim isolado, é bastante inferior. Adicionalmente, esta solução permite diminuir a quantidade de pó que se acumula por cima do referido isolamento quando situado na esteira, já que a maior parte do pó é proveniente das telhas e dos espaços entre elas. Com este sistema de isolamento, o desvão não atingiu, assim, temperaturas tão elevadas nem tão baixas, sendo pois esta uma solução a ter em conta, em especial, nos desvãos de cobertura úteis para ocupação humana. Obviamente que esta solução de colocação do isolamento nas vertentes terá influência no grau de ventilação do desvão que se processa entre as telhas,

sendo que para manter um determinado nível de ventilação será certamente necessário desenvolver medidas complementares;

- Os valores máximos da temperatura do ar dos desvãos de cobertura dão-se em geral um pouco antes dos valores máximos de temperatura exterior, assim como os valores máximos da radiação solar dão-se em geral antes dos valores máximos da temperatura exterior, sendo que tal ilustra o quanto a radiação solar é relevante no que diz respeito às temperaturas máximas atingidas nos referidos desvãos;
- Verificou-se que a inclusão, efetuada nos ensaios realizados no âmbito deste trabalho, de embalagens de cartão para alimentos líquidos, no caso, para leite UHT, por cima dos isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade colocados na laje de esteira, permitiu uma significativa diminuição do fluxo de calor.

9.2.2 DA COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES COM OS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Foram executadas três comparações entre os resultados dos ensaios *in situ* (correspondentes a três situações monitorizadas) e os obtidos pela simulação numérica através do programa informático CAPSOL, com o objetivo de validar todo o procedimento inerente ao uso deste *software* para a consideração de vários outros cenários.

Assim, inicialmente foi realizada a comparação (das temperaturas do quarto e do desvão, das temperaturas superficiais da laje de esteira e dos fluxos de calor através da esteira) para a situação inicial de não uso de qualquer ITRBE, tendo-se obtido grande proximidade entre as medições *in situ* os resultados do CAPSOL.

Numa segunda fase, foi executada a comparação (igualmente das temperaturas do quarto, do desvão, das temperaturas superficiais e dos fluxos de calor respetivamente na e através da laje de esteira) para a situação da aplicação de ITRBE por cima da laje de esteira. Ao nível de temperaturas, obteve-se grande proximidade entre as medições *in situ* os resultados do CAPSOL.

Por fim, foi realizada a comparação, no que concerne às temperaturas e fluxos de calor considerados anteriormente, para a situação de aplicação de ITRBE tanto por cima da laje de esteira como por baixo das vertentes. No que respeita às temperaturas das zonas quarto e

desvão de cobertura, verifica-se uma grande proximidade entre as medições *in situ* e os resultados da simulação numérica. Quanto às temperaturas superficiais e aos fluxos de calor, respetivamente, na e através da laje de esteira, mesmo com a existência de alguns períodos de quebra no registo dos resultados das medições, pode-se, através dos períodos restantes, igualmente inferir da grande proximidade entre os resultados *in situ* e os obtidos pelo CAPSOL.

Deste modo, concluiu-se pela validade de todos os procedimentos (metodologia de introdução de dados e demais processos seguidos pelo autor no uso do CAPSOL) no que respeita à simulação de edifícios, do género do caso base utilizado, ora isolados termicamente com materiais resistivos ora com ITRBEs, decorrendo pois daqui a segurança no uso da simulação numérica com recurso ao CAPSOL para o estudo de outros cenários.

9.3 CONCLUSÕES RELATIVAS AOS VÁRIOS CENÁRIOS SIMULADOS

Dos vários cenários simulados numericamente com recurso ao CAPSOL, chegou-se às seguintes conclusões mais relevantes:

- Os isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade (ITRBEs), com valores baixos da emissividade das suas superfícies, proporcionam em geral temperaturas mais confortáveis e diminuem os fluxos de calor que provocam desconforto. A ação dos ITRBEs é mais eficaz nos compartimentos cujo teto é a cobertura, do que naqueles imediatamente abaixo de um desvão de cobertura;
- Os ITRBEs têm um impacto mais relevante nas coberturas do que nas fachadas. Caso a esteira seja leve e não pesada, os isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade têm uma ação mais eficaz para os compartimentos imediatamente abaixo do desvão;
- Os ITRBEs têm uma ação muito interessante se aplicados nos dispositivos de sombreamento dos vãos envidraçados, como são o caso de portadas metálicas. Foi verificado que, invariavelmente, as superfícies interiores do quarto, que apresentavam temperaturas significativamente mais elevadas, foram as faces interiores das portadas que fazem oclusão das janelas pelo interior. Ao considerar-se a aplicação de revestimento refletante de baixa emissividade na face exterior de cada portada, tal provocou um significativo abaixamento da temperatura da face interior das portadas e uma não negligenciável redução da temperatura operativa média e máxima do quarto;

- Para se tirar o máximo proveito, devem-se colocar os ITRBEs por baixo das vertentes da cobertura, em especial com a superfície de baixa emissividade voltada para baixo, de forma a não sofrer a ação do pó. Os ITRBEs para funcionarem efetivamente, devem possuir uma caixa de ar de pelo menos 3 cm associada a cada superfície de baixa emissividade;
- Em caixa de ar de paredes duplas ou de tetos falsos, e no caso de ITRBEs com duas superfícies de baixa emissividade, o ideal é aplicá-los no meio da caixa de ar em causa;
- A colocação de ITRBEs por cima das esteiras e em contacto com os desvãos de cobertura não é aconselhável, devido ao facto de que com o passar do tempo ficam sujeitos à acumulação de quantidades elevadas de pó e sujidades várias, diminuindo tal significativamente as características baixo emissivas da respetiva superfície superior. Concluiu-se igualmente que o efeito do pó é mais relevante no período de máximas temperaturas anuais;
- A aplicação em coberturas e fachadas de revestimentos exteriores refletantes é em geral benéfico nos dias de elevada radiação solar e temperatura. Já no período de menores temperaturas exteriores, a ação destes revestimentos refletantes pode até ser prejudicial, sobretudo devido ao facto do ITRBE minorar, de forma significativa, os ganhos solares através dos elementos construtivos em que está aplicado;
- A ação dos ITRBEs é sobretudo relevante nos climas mais quentes e nos períodos de maiores temperaturas e radiação solar (verão). A atenuação das temperaturas interiores máximas é mais significativa em locais com temperaturas e radiações solares muito elevadas (caso de Petrolina) e as médias em locais quentes mas com menores amplitudes térmicas (caso de Dili). A atenuação das temperaturas em termos médios diários, pelo uso dos ITRBEs, é inferior à atenuação em termos máximos;
- Nos períodos de menores temperaturas (inverno), a ação dos ITRBEs é mais limitada, existindo situações em que até a sua atuação é prejudicial pela diminuição dos ganhos solares;
- Os ITRBEs, face aos resistivos, provocam em geral, o trânsito de menores fluxos de calor por radiação;
- O uso de ITRBEs, que apresentam valores das emissividades da sua superfície surpreendentemente elevados, colocando inclusivamente em causa a própria classificação legal de superfície de baixa emissividade, provoca resultados substancialmente piores do que o uso de ITRBEs com superfícies de efetiva baixa emissividade;
- Em coberturas planas com teto falso estanque, a melhor posição para a colocação do ITRBEs é em posição intermédia na respetiva caixa de ar. Note-se, no entanto, que há que ter

em conta as implicações desta solução, sobretudo em termos de prevenção da ocorrência de condensações internas;

- Os isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade (ITRBEs) devem ser pensados em termos de complemento aos isolamentos resistivos e não como material de isolamento alternativo.

9.4 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Tendo em conta as conclusões anteriores, o autor propõe o desenvolvimento dos seguintes futuros estudos de investigação, para os locais já considerados neste estudo, tanto ao nível de ensaios experimentais como de simulação numérica:

- Avaliação do impacto de várias estratégias de ventilação dos desvãos de cobertura e dos compartimentos situados por baixo daqueles, para que em períodos de verão, tanto diurnos como noturnos, se possa, a este nível, otimizar a utilização dos isolamentos térmicos refletantes de baixa emissividade (ITRBEs) em termos de temperaturas atingidas e de minoração das necessidades de energia para climatização;
- Estudo do comportamento dos ITRBEs aplicados nas coberturas em período de inverno, sob o ponto de vista higrotérmico, sendo aqui muito importante a atenção ao funcionamento destes isolamentos igualmente como barreira para-vapor;
- Investigar o comportamento higrotérmico de folhas de alumínio perfuradas, com o objetivo de que ao serem incorporadas nos ITRBEs, possam estes ser permeáveis à difusão do vapor;
- Estudo aprofundado do comportamento em coberturas de vários tipos de ITRBEs, inclusivamente provenientes do aproveitamento de embalagens contendo alumínio, como é o caso das embalagens para alimentos líquidos ou dos tubos de pasta dentífrica;
- Otimização técnico-económica-ambiental da colocação simultânea dos ITRBEs com os isolamentos térmicos resistivos;
- Avaliação do impacto da utilização dos ITRBEs, e sua comparação, ora em separado, ora em conjunto, com os isolamentos térmicos resistivos, sob o ponto de vista de consumo de energia para aquecimento e arrefecimento ambiente das habitações, de forma a manter em contínuo uma determinada temperatura de referência;
- Desenvolver metodologias que possam, para várias soluções de isolamento que integrem ITRBEs, efetuar a verificação regulamentar dos requisitos mínimos de coeficiente de transmissão térmica;

- Estudar mais a fundo soluções de uso de ITRBEs nas portadas, e noutros dispositivos de sombreamento, tanto exteriores como interiores, dos envidraçados;
- Investigar as consequências, e implementar as respetivas medidas mitigadoras, da colocação de ITRBEs em superfícies exteriores, onde a propagação de radiação visível e infravermelha pode causar desconforto em edifícios vizinhos bem como aos próprios peões;
- Testar o comportamento da colocação de ITRBEs na face interior das fachadas ventiladas e de pisos ventilados de coberturas planas.

BIBLIOGRAFIA

AIRAH – Australian Institute of Refrigeration, Air-Conditioning and Heating Inc. (2007). *AIRAH handbook*. Melbourne, Australia.

AFNOR - Association Française de Normalization (1983). *Isolants Thermiques Destinés au Bâtiment – Definition*, NF P 75.01. Saint-Denis La Plaine, France.

Ahmad, I. (2010). *Performance of antisolar insulated roof system*. *Renewable Energy*, 35, 36-4.

Akutsu, M. (1998) *Método para avaliação do desempenho térmico de edificações no Brasil*. Tese Apresentada para Obtenção do Grau de Doutorado em Arquitetura, Universidade Federal de São Paulo, Brasil.

Akutsu, M. e Vittorino, F. (1999). *Avaliação comparativa do desempenho térmico de cobertura com e sem isolante térmico*, Relatório Técnico nº 42.690. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de S. Paulo, Brasil.

Algarni, S. e Darin, N. (2015). *Influence of dust accumulation on building roof thermal performance and radiant heat gain in hot-dry climates*. *Journal of Energy and Buildings* Vol. 104 (2015) 181–190.

Al-Homoud, M. (2004). *Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials*. Elsevier, Building and Environment Journal 40 pp. 353-366.

Almeida, M. (2006). *Incorporação de polietileno pós-consumo em espumas de polietileno de baixa densidade*. Dissertação apresentada na Universidade de Caxias do Sul visando a obtenção do grau de mestre em Materiais, Brasil. [Em linha]. Disponível em <http://tede.uces.br/tde_arquivos/6/TDE-2006-12-11T121303Z-56/Publico/DISSERTACAO%20MARCELO%20GIUSTI%20DE%20ALMEIDA.pdf>.[consultado em 20 de Abril de 2012].

Armerin, S.; Cherry, N (2003). *Isolamentos térmicos por reflexão*. e-Mat – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil, São Paulo, Brasil.

Arumugam, R.; Garg V.; Ram V. e Bhatia A. (2015). *Optimizing roof insulation for roofs with high albedo coating and radiant barriers in India*. *Journal of Building Engineering* Vol. 2(2015) pp. 52–58.

AS - AUSTRALIA STANDARDS (1976). Reflective foil laminate, AS 1903. Sydney, Australia.

Asadi, S.; Hassan, M. e Beheshti, A. (2012). *Performance evaluation of an attic radiant barrier system using three dimensional transient finite element method*. *Journal of Building Physics* Vol. 36(3) pp. 247–264.

Asadi, S.; Hassan, M. e Beheshti, A. (2012a). *Development and validation of a simple estimating tool to predict heating and cooling energy demand for attics of residential buildings*. Journal of Energy and Buildings Vol. 54 (2012) 12–21.

Asadi, S. e Hassan, M. (2014). *Evaluation of the thermal performance of a roof-mounted radiant barrier in residential buildings: Experimental study*. Journal of Building Physics Vol. 38(1) pp. 66–80.

ASTM – American Society for Testing and Materials (1994) . *Standard Test Method for Elevated Temperature and Humidity Resistance of vapor Retarders for Insulation, ASTM C 1258-94*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM - American Society for Testing and Materials (1997). *Standard Practice for Installation and Use of Radiant Barrier Systems (RBS) in Building Construction*, ASTM C 1158. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2000). *Standard Specification for Exterior Solar Radiation Control Coatings on Buildings, ASTM C 1483-00*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2007). *Practice for Installation and Use of reflective insulation in building constructions*, ASTM C 727 - 01. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2015). *Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers, ASTM C 1371-15(2015)*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2010). *Standard Practice for Estimation of Heat Gain or Loss Through Ceilings Under Attics Containing Radiant Barriers by Use of a Computer Program, ASTM C1340/C1340M-10*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2010a). *Standard Terminology Relating to Thermal Insulation. ASTM C168-10*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2011). *Standard Specification for Reflective Insulation for Building Applications, ASTM C 1224*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2012). *Standard Specification for Sheet Radiant Barriers for Building Construction Applications, ASTM C1313*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

Baldinelli, G. (2010). *A methodology for experimental evaluations of low-e barriers thermal properties: Field tests and comparison with theoretical models*. Building and Environment, 45, pp.1016 – 1024.

BBA - British Board of Agrément (2010). *Reflective foil insulation – Conventions for U value calculations*. Information Bulletin N° 3. Watford. UK.

BBA - British Board of Agrément (2012). Testing methodologies for the thermal performance of reflective foil thermal insulation products. Information Bulletin N° 7. Watford. UK.

Belusko M., Pockett J., Bruno, F. e Saman, W. (2010). *Summer Thermal Resistance Measurement of Timber Framed Roofing Systems and Benefits of Reflective Paints*. Proceedings of Solar 2010, the 48th AuSES Annual Conference, Canberra, Austrália.

Belusko, M., Bruno, F. e Saman, W. (2011). *Investigation of the thermal resistance of timber attic spaces with reflective foil and bulk insulation, heat flow up*. Elsevier. Applied Energy 88 (2011) pp.127-137.

Blázquez, A. (2009). *Memória de actividades relacionadas com la innovación en la construcción: Documento de Idoneidad Técnica (DIT). 50 anos de la UEAtc*. Nota Técnica. Informes de la Construcción. Vol. 61, 516, 83-100. ISSN: 0020-0883.

Borges, J. (2008). *A cosmologia e a radiação cósmica de fundo, como elemento motivador no ensino secundário*. Dissertação Apresentada na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto como requisito para a Obtenção do Grau de Mestre em Ensino da Astronomia. Porto, Portugal.

BR 443 (2006). *Conventions for U-value calculations*. Watford U.K..

Cabeza, F., Castell, A., Medrano, M., Martorell, I. Pérez, G. e Fernández, I. (2010). *Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction*. Elsevier. Energy and Buildings 42 (2010) pp. 630-636.

Carletto, C. (2005). *Subcoberturas: Aplicação de isolantes térmicos em sistemas de coberturas*. Dissertação Apresentada para Obtenção do Grau de Mestre em Ciências de Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de S. Carlos da Universidade de São Paulo, Brasil.

Cassol, F. (2009). *Aplicação da Análise Inversa Via Otimização Extrema Generalizada em Projetos de Iluminação*. Dissertação Apresentada para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia pela Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Cavalcanti, M. (2011). *Análise da influência de superfícies refletivas nas perdas de calor de sistemas térmicos*. Dissertação Apresentada para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil.

Cavaliere, C. (2009). *Fenômenos de Transporte – Transferência de Calor por Radiação Térmica*. Universidade Estadual de Campinas, Brasil. [Em linha]. Disponível em <<http://tolstenko.net/blog/dados/Unicamp/2009.2/em524/Aula%2030.pdf>>. [Consultado em 22/03/2012].

CEN (2007). Comité Européen de Normalisation. *EN-ISO 6946 - Building components and building elements — Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation method*. Brussels.

CEN (2012). Comité Européen de Normalisation. *EN 16012 - Thermal insulation for buildings - Reflective insulation products - Determination of the declared thermal performance*. Brussels.

CEN/TC 89 (2016). *N 1838 - Draft minutes plenary meeting 2016 Edinburgh*. Secretariat: SIS (Sweden).

Černe, B. e Medved, S. (2005). *The dynamic thermal characteristics of lightweight building elements with a forced ventilated cavity and radiation barriers*. Energy and Buildings, 37, pp. 972-981.

Commission Chargée de Formuler des Avis Techniques (2007). *Performances des produits réfléchissants opaques utilisés dans l'enveloppe des bâtiments en tant que complément d'isolation thermique*. Grupe Spécialise n°20 – Produits et Procédés Spéciaux d'Isolation. Paris.

Courrol, L. e Preto, A. (2010). *Apostila Teórica Óptica Técnica I*. Faculdade de Tecnologia de São Paulo. Brasil [Em linha]. Disponível em < http://www.fatecsp.br/paginas/apostila_teorica.pdf >. [Consultado em 22/03/2012].

Costa, A.; Santos, C. (2014). *Avaliação de produtos de alta refletância na reabilitação de coberturas planas. Estudo experimental*. Apresentado no Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, Guimarães, Portugal.

Cozza E.; Alloisio M., Comite A., Tanna G., Vicini S. (2015). *NIR-reflecting properties of new paints for energy-efficient buildings*. Journal Solar Energy 116 (2015) 108–116.

CTE (2006). Código Técnico de la Edificación, Ministerio de Vivienda, España
Cucinotta, F.; Shavers, M.; Johnson, L.; Saganti, P. e Miller J. (2003). *Radiation Protection Studies of International Space Station Extravehicular Activity Space Suits*.

Cucinotta, F et al (2003). *Radiation Protection Studies of International Space Station Extravehicular Activity Space Suits*. NASA - National Aeronautics and Space Administration, Johnson Space Center Houston, Texas, USA. [Em linha]. Disponível em <<http://ston.jsc.nasa.gov/collections/TRS/techrep/TP-2003-212051.pdf>>. [Consultado em 22/03/2012].

Daré, C.; Targa L. e Isa, M. (2005). *Avaliação da Eficiência de Isolantes Térmicos por Reflexão, Utilizados como Subcoberturas*. Revista Energia na Agricultura, Botucatu, São Paulo, Brasil. [Em linha]. Disponível em <http://200.145.140.50/html/CD_REVISTA_ENERGIA_vol2/vol20n22005/Artigos/Carlos%20Alberto%20Neme%20Dare.pdf>. [Consultado em 02/03/2011].

Devices & Services Company (2011). *D&S Technical Note 11-2. Model AE1 Emittance Measurements using a Port Adapter, Model AE-ADP*. Dallas, Texas, USA.

Direção Geral de Energia e Geologia (2013). *Despacho (extrato) nº 15793 – F/2013 de 3 de Dezembro*.

Direção Geral de Energia e Geologia (2013_a). *Despacho (extrato) nº 15793 – K/2013 de 3 de Dezembro*.

DIT (2006). *Documento de Idoneidad Técnica 478, Aislamiento térmico reflectivo POLYNUM HR para cerramientos com câmara de aire (cubiertas, fachadas y suelos o techos)*. Instituto de Ciências da Construção Eduardo Torroja, España.

DIT (2007). *Documento de Idoneidad Técnica 487, Aislamiento térmico reflectivo TRIPOMANT para cerramientos com câmara de aire (cubiertas, fachadas y suelos o techo)s*. Instituto de Ciências da Construção Eduardo Torroja, España.

DIT (2009). *Documento de Idoneidad Técnica 539/09, Aislamiento térmico para cerramientos com câmara de aire (cubiertas, fachadas y suelos o techos) Termoplus*. Instituto de Ciências da Construção Eduardo Torroja, España.

DIT (2010). *Documento de Idoneidad Técnica 487, Aislamiento térmico reflectivo TRIPOMANT para cerramientos com câmara de aire (cubiertas, fachadas y suelos o techos)*. Instituto de Ciências da Construção Eduardo Torroja, España.

DOE - Department of Energy. Assistant Secretary, Energy Efficiency and Renewable Energy (1997). *Insulation Fact Sheet*. Merrifield. USA.

Dominguéz, M. (2005). *Prestaciones de los Films Reflexivos en la edificación*. [Em linha]. Disponível em <<http://blogtecnico.coag.es/wp-content/uploads/2007/07/articuloofilmreflexivo.pdf>>.[Consultado em 18/05/2012].

Dornelles, K.; Caram, R. e Sichieri, E. (2015). *Natural weathering of cool coatings and its effect on solar reflectance of roof surfaces*. Journal of Energy Procedia. Vol. 78, pp. 1587-1592.

Eames, P. (2009); *Multi-foil Insulation*. Department for Communities and Local Government. Londres.

EPA - USA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Department of energy develops energy star roof products program*. [Em linha]. Disponível em <http://www.energystar.gov/ia/partners/manuf_res/USEPA_ES.pdf>.[Consultado em 02/03/2012].

ENERGY STAR. [Em linha]. Disponível em <http://www.energystar.gov/ia/partners/bldrs_lenders_raters/downloads/NationalProgramRequirements_v3.pdf>.[Consultado em 07/06/2012].

- Escudero, C.; Martin, K.; Erkoreka, A.; Flores, I. e Sala, J. (2013). *Experimental thermal characterization of radiant barriers for building insulation*. Journal of Energy and Buildings. Vol. 59 (2013) pp. 62-72.
- Fairey, P; Swam, M. e Beal, D (1988). *RBS Technology: Task.3 Report (Draft)*. Sponsored by Florida Power & Light Company and the U.S Department of Energy, Florida Solar Energy Center, Cape Canaveral, USA.
- Ferreira, M. (2004). *Caudais de ventilação recomendados para edifícios residenciais: Impacto ao Nível do Conforto Térmico e do Consumo de Energia para Aquecimento*; Dissertação de Mestrado em Construção de Edifícios, FEUP, Porto.
- Filho, J. e Santos, T. (2014); *Thermal analysis of roofs with thermal insulation layer and reflective coatings in subtropical and equatorial climate regions in Brazil*. Journal of Energy and Buildings. Vol.84, pp. 466–474.
- Gonçalves, L.; Matias, L.; Faria, P. (2014). *Avaliação do Desempenho Térmico por Análise Termográfica de Tintas Refletantes Aplicadas em Fachadas com ETICS*; Apresentado em Argamassas 2014, I Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento, Coimbra, Portugal.
- Guo W.; Qiao X.; Huang, Y. Fang M. e Han X (2012). *Study on energy saving effect of heat-reflective insulation coating on envelopes in the hot summer and cold winter zone*. Journal of Energy and Buildings Vol. 50 (2012) pp. 196–203.
- Gustavsen, A. e Berdahi, P. (2003). *Spectral Emissivity of Anodized Aluminum and the Thermal Transmittance of Aluminum Window Frames*; Nordic Journal of Building Physics Vol. 3, Stockholm, Sweden.
- Hall J. (1988). *Radiant Barrier Testing to Assess Effects of Dust Accumulation, Attic Ventilation, and Other Key Variables*. TVA Report No. TVA/OP/EDT – 88/25, Tennessee Valley Authority, Office of Power, Division of Energy Demonstrations and Technology, USA.
- Hanlon, J. (1992). *1st ed. Handbook of Package Engineering*. Chapter 4 Coatings and Laminations, Technomic Publishing, Lancaster, Pennsylvania, USA.
- Hewitt, P. (2002); *Física Conceitual*. 9ª Edição, Bookman - Artmed Editora, S. Paulo, Brasil.
- Incropera, P. e DeWitt, D. (2008). *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 6ª edição, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, Brasil.
- Joy F. (1958). *Improving Attic Space Insulating Values*. ASHRAE Transactions, Vol. 64, pp. 251-266, USA.
- Lee, S.; Chin, L. Salleh, E. (2016). *Reflective thermal insulation systems in building: A review on radiant barrier and reflective insulation*. Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol.65(2016) pp. 643–661.

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia (2009). *Manual de Instalação e Utilização do Software Solterm. Versão 5.1.0.*

Lauret, P.; Miranville, F.; Boyer, H.; Garde, F.; Adelard, L.(2006). *Bayesian Parameter Estimation of Convective Heat Transfer Coefficients of a Roof-Mounted Radiant Barrier System.*

Lee, S; Kang, J.; Kim; J. (1999). *Modeling and calibration of lateral heat loss rate in measuring the R value of partly heated wall.* Proceedings of Building Simulation 1999, International Building Performance Simulation Association, Kyoto, Japan.

Levins, W e Karnitz, M (1988). *Heating Energy Measurements of Single-Family Houses With Attics Containing Radiant Barriers in Combination With R-11 and R-30 Ceiling Insulation.* ORNL/CON-239, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil (1999). *Determinação da Condutibilidade Térmica Espuma de Polietileno Extrudido (PEF).* Processo nº083/73/11484, Lisboa, Portugal.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil (1998). *Tela Termo-Refletora Tripolux. Avaliação do desempenho térmico em cobertura.* Boletim nº 27/98, Lisboa, Portugal.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil (1998_a). *Avaliação do Desempenho Térmico. Tela-Termorefletora Tripolux.* Processo nº083/72/11057, Lisboa, Portugal.

Lotz, W. (1969). *Facts about thermal insulation*, ASHRAE, USA.

Martins, J. (2004). *Eletrónica*. Departamento de Eletrónica Industrial, Universidade do Minho. [Em linha]. Disponível em <[http://dei-s1.dei.uminho.pt/outraslic/ engma ter iai s/ei/Apontamentos.pdf](http://dei-s1.dei.uminho.pt/outraslic/engma%20ter%20ia%20s/ei/Apontamentos.pdf)>. [Consultado em 20/03/2012].

Matias, L. (2001). *Avaliação do desempenho térmico de protecções reflectantes aplicadas em coberturas inclinadas.* Dissertação elaborada no LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Física-Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Medina, M.; O’Neal, D. Turner, W. (1992). *Effect of attic ventilation on the performance of radiant barriers*; Journal of Solar Energy Engineering, Vol.114, pp. 234–239.

Medina, M. (2000a). *On the performance of radiant barriers in combination with different attic insulation levels.* Energy and Buildings. Vol. 33, pp. 31-40.

- Medina, M. (2000b). *Effects of shingle absorptivity, radiant barrier emissivity, attic ventilation flowrate, and roof slope on the performance of radiant barriers*. International Journal of Energy Research. Vol. 24, pp. 665-678.
- Medina, M. e Frempong, M. (2003). *Evaluation of Ceiling Heat Fluxes in Residential Buildings with Attic Radiant Barriers in Prevalent Climates Across the United States*. Proceedings of Building Integration Solutions, Architectural Engineering 2003 Conference, U.S.A.
- Medina, M. e Young, B. (2006). *A perspective on the effect of climate and local environmental variables on the performance of attic radiant barriers in the United States*. Building and Environment. Vol. 41, pp 1767-1778.
- Medina, M. e Young, B. (2008). *Evaluating the Sensitivity of Attic Radiant Barrier Performance to Climate Parameters*. Journal of Energy Engineering. Vol. 134, pp 2-5.
- Michels C. (2007). *Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes*. Dissertação Apresentada para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Michels, C.; Lamberts, R. e Güths, S. (2008a). *Theoretical/experimental comparison of heat flux reduction in roofs achieved through the use of reflective thermal insulators*. Energy and Buildings. Vol. 40. pp 438-444.
- Michels, C.; Lamberts, R. e Güths, S. (2008b). *Evaluation of heat flux reduction provided by the use of radiant barriers in clay tile roofs*. Energy and Buildings. Vol. 40. pp 445-451.
- Millet, F. (1984). *La Mesure des Temperatures*. Pyc Édition, Paris, France.
- Miranville, F.; Boyer, H; Mara, T; Garde, F. (2003). *On the thermal behaviour of roof-mounted radiant barriers under tropical and humid climatic conditions: modelling and empirical validation*. Energy and Buildings, 35, 997-1008.
- Miranville, F.; Boyer, H; Lauret, P.; Lucas, F.(2008); *A combined approach for determining the thermal performance of radiant barriers under field conditions*. Solar Energy, 82, 399-410.
- Miranville, F. Lauret, P. Medina, M. Bigot, D. (2011); *A Simplified Model for Radiative Transfer in Building Enclosures With Low Emissivity Walls: Development and Application to Radiant Barrier Insulation*. Journal of Solar Energy Engineering, 133, 021009-1 a 021009-13.
- Modest, F. (1993). *Radiative heat transfer*. McGraw Hill Int. Editions, Singapore.
- Moita, F. (1987). *Energia Solar Passiva*. Direção-Geral de Energia, Imprensa Nacional-Casa da Moeda, Lisboa.

National Physical Laboratory (2001). *IR Hemispherical Spectral Reflectance and Total Emittance*. Reference E01070229/1. Teddington Middlesex, U.K.

Noboa, H. (1991). *Influence of dust on the emissivity of radiant barriers*. Tese submetida à Universidade do Texas como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em ciência, USA.

Ober, G e Volckhausen, T (1988). *Radiant Barrier Insulation Performance in Full-Scale Attics With Soffit and Ridge Venting*. Proceedings of the Fifth Annual Symposium on Improving Building Energy Efficiency in Hot and Humid Climates, Houston, USA, pp. 174-185.

Oliveira, L.; Sarantópoulos, C. ; Teixeira, F. e Suguiuti, P. (2011). *Determinação da força de adesão da metalização com alumínio em filmes plásticos utilizados em embalagens flexíveis*. Polímeros, vol.21, no.3, pp. 233-239, São Carlos, Brasil. . [Em linha]. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282011000300013&script=sci_arttext>. [consultado em 3_4_2012].

Padilha, A. (2007). *Materiais de Engenharia_microestrutura e propriedades*. Hemus Livraria, Distribuidora e Editora, Brasil.

Park. B. e Krarti M. (2016). *Energy performance analysis of variable reflectivity envelope systems for commercial buildings*. Journal Energy and Buildings. Vol. 124 (2016) pp 88–98.

Peres, I. (2005). *O ensino da análise química espectral: Um compromisso entre químicos, fabricantes de instrumentos científicos e professores*. Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em química para o ensino, Lisboa, Portugal.

Perin, A. (2009); *Desenvolvimento de um equipamento para a medição de emissividade*. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Brasil.

Physibel (2002); *CAPSOL version 4.0. Computer Program to Calculate Multizonal Transiente Heat Transfer*.

Physibel (2010); *Preparing Climatologic Data for Use in the Physibel Software*. Physibel Software Pilot Book version 2.

Physibel (2010_a); *Thermal Analysis of the Building Envelope in Summer Conditions. Parte II: Transparent Constructions*. Physibel Software Pilot Book version 2.

Physibel (2010_b); *Thermal Simulation of Reflective Foils*. Physibel Software Pilot Book version 2.

Proclira (2007). *Radiação Solar e Terrestre. Módulo 3*. Universidade de Évora. Portugal. [Em linha]. Disponível em <<http://www.proclira.uevora.pt/modulos/modulo3.pdf>>. [Consultado em 22/03/2012].

Rodrigues, A; Piedade, A e Braga A. (2009). *Térmica de Edifícios*. Edições Orion, Amadora, Portugal.

Santos, L. (2006). *Termografia Infravermelha em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas*. Dissertação apresentada na Universidade Federal de Itajubá como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia da Energia, Itajubá, Brasil. [Em linha]. Disponível em <<http://adm-net-a.unifei.edu.br/ppl/pdf/0032852.pdf>>. [consultado em 01/04/2012].

Santos, G. e Mendes N. (2015); *Numerical analysis of hygrothermal performance of reflective insulated roof coatings*. Journal of Applied Thermal Engineering. Vol.81, pp. 66–73.

Santos, C. ; Matias, L. (2006). *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*, I.T.E. 50, L.N.E.C., Lisboa.

Sousa, D. (2014); *Estudo da utilização de tintas com alta refletância na envolvente exterior dos edifícios*. Dissertação apresentada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil; FEUP, Porto, Portugal.

Saraiva, L. (2011). *Transferência de calor*. Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil. [Em linha]. Disponível em <<http://www.scribd.com/doc/73824874/3/DIFUSAO-E-ADVECCAO>>. Consultado em [30_3_2012].

Silva, M (2006). *Meteorologia e Climatologia*. Versão Digital 2. Recife Pernambuco, Brasil. [Em linha]. Disponível em <<http://www.scribd.com/doc/50857947/60/Cons-tante-solar>>. [consultado em 30/4/2012].

Soubdhan, T.; Feuillard, T.; Bade, F. (2005). *Experimental evaluation of insulation material in roofing system under tropical climate*. Solar Energy 79, 311-320.

Supreme Court of England and Wales (2007). *Order. Claim No. Co/9218/2006*. Disponível em <<http://www.actis-isolation.com/news/40pdf13.pdf>>. [consultado em 30/4/2010].

Swiss Federal Office of Energy (1999). *Meteonorm. Global meteorological database for solar energy and applied climatology. Version 4.0*.

UNE EN (2012). *UNE EN ISO 6946. Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo. (ISO 6946:2007)*. AENOR, España.

UNE EN (1998) *UNE EN 12086 – Productos aislantes térmicos para aplicación en la edificación*. Determinación de las propiedades de transmisión del vapor de agua. AENOR, España.

UNE EN (2007). *UNE EN 13501-1. Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego*. AENOR, España.

Valério J. (2007). *Avaliação do Impacte das Pontes Térmicas no Desempenho Térmico e Energético de Edifícios Residenciais Correntes*. Dissertação elaborada no Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

Vecchia F. (2001). *Isolamento por reflexão*. VI Encontro Nacional e III Encontro Latino Americano sobre Conforto e Ambiente Construído - ENCAC 2001; São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil.

Vittorino, F.; Sato, N. e Akutsu, M. (2003). *Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados a coberturas*. VII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente (ENCAC)- COTEDI 2003, Curitiba-PR-Brasil, pp. 1277_1284.

Webber, M. e Ricci, T. (2006). *Inserção de mecânica quântica no ensino médio: Uma proposta para professores*. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. [Em linha]. Disponível em <http://www.if.ufrgs.br/tapf/v17n5_Webber_Ricci.pdf>. [Consultado em 30/04/2012].

Williams, R. e Ballard, G. (2007). *Evaluation of the thermal performance of insulation systems used in roof structures*. Report Mat 8. Industry and Innovation Division, National Physical Laboratory. Middlesex, United Kingdom.

Winiarski, D. e O'Neal, D. (1996). *A quasi-steady-state model of attic heat transfer with radiant barriers*. Energy and Building 24, pp. 183-184. Elsevier Science, New York.

Wolf S. (1967). *A theory for the effects of convective air flow through fibrous thermal insulation*. National Research Council of Canada - Division of Building Research, Ottawa, Canada.

Zhijian K. (2006). *Energy saving analysis of an air-conditioned room with parasec radiant barrier*. Temasek Engineering School, Temasek Polytechnic Singapore - SGBC - Singapore Green Building Council. Em linha]. Disponível em <<http://www.sgbc.sg/index.php/green/>> [consultado em 12/03/2012].

Zinzi, M. (2016). *Characterisation and assessment of near infrared reflective paintings for building facade applications*. Journal Energy and Building 114 (2016), pp. 206-213.

PÁGINAS DA INTERNET:

AFCAL - Associação de Fabricantes de Embalagens de Cartão para Alimentos Líquidos de Portugal. [Em linha]. Disponível em <http://www.afcal.pt/embalagens_composicao.php>. [consultado em 25/09/2015].

Associação Brasileira de Normas Técnicas. [Em linha]. Disponível em <<http://www.abntcatalogo.com.br/>>. [consultado em 25/09/2015].

Associação Europeia de Folha de Alumínio [Em linha]. Disponível em <<http://www.alufoil.org/>>[consultado em 25/09/2015].

Billy Eliis Roofing Company. [Em linha]. Disponível em <<http://www.billyellisroofing.com/thermadeck.html>>. [consultado em 25/09/2015].

BM Trada. [Em linha]. Disponível em <(http://www.just-insulation.com/pdfs/multifoil/actis/BM_Trada.pdf> [consultado em 25/09/2014].

Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica. [Em linha]. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=301>>. [consultado em 25/09/2015].

Departamento de Física da Universidade de Coimbra. [Em linha]. Disponível em <http://nautilus.fis.uc.pt/wwwfi/hipertextos/espectro/hiper_espectro_vis.html> .[consultado em 25/09/2015].

Departamento de Física da Universidade Federal do Paraná. [Em linha]. Disponível em <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-8.html>>. [consultado em 25/09/2015].

Departamento de Física da Universidade Federal do Paraná_b. [Em linha]. Disponível em <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap1/cap1-2.html>>. [consultado em 25/09/2015].

ENERGY STAR. [Em linha]. Disponível em <http://www.energystar.gov/ia/partners/bldrs_lenders_raters/downloads/NationalProgram_Requirements_v3.pdf>. [consultado em 25/09/2015].

Estados e Capitais do Brasil.com. [Em linha]. Disponível em <<http://www.estadosecapitaisdobrasil.com/mapas-do-brasil/>>. [consultado em 22_3_2016].

IETcc – Instituto de Ciências de La Constucción Eduardo Torroja. [Em linha]. Disponível em: <<http://www.ietcc.csic.es/index.php/es/>>. [consultado em 25/09/2015].

INAPE – Instituto de Astronomia e Pesquisas Espaciais. Araçatuba. São Paulo. Brasil [Em linha]. Disponível em <<http://leobenez.tripod.com/muitas-luzes.html>>. [consultado em 25/09/2015].

Instituto para o Desenvolvimento da Habitação Ecológica do Brasil. [Em linha]. Disponível em <http://www.idhea.com.br/ecotelha_tubo.asp>. [consultado em 25/09/2015].

Júnior, J. – Universidade Federal de Rondônia. [Em linha]. Disponível em <<http://www.scribd.com/doc/13555202/Radiacao-Termica-Aspectos-Classicos-e-Quanticos>>. [consultado em 25/09/2015].

NASA - Chandra X-Ray Observatory. [Em linha]. Disponível em <http://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/main/index.html>. [consultado em 25/09/2015].

NASA – Fermi Gamma Ray space telescope [Em linha]. Disponível em <<http://fermi.gsfc.nasa.gov/>>. [consultado em 25/09/2015].

NASA - International Space Station (ISS) – Interactive Reference Guide. [Em linha]. Disponível em <<http://www.nasa.gov/externalflash/ISSRG/pdfs/mmod.pdf>>. [consultado em 25/09/2015].

NASA – IPAC - Infrared Processing and Analysis Center. [Em linha]. Disponível em <http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/classroom_activities/herschel_experiment.html>. [consultado em 25/09/2015].

Portal Laboratórios Virtuais de Engenharia Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. [Em linha]. Disponível em <http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=248&Itemid=422>. [consultado em 25/09/2015].

Portal Metálicas. [Em linha]. Disponível em <<http://www.metalica.com.br/ecotelhado>> [consultado em 25/09/2015].

Revista Alumínio. [Em linha]. Disponível em <http://www.revista_aluminio.com.br/recicla-inovacao/16/artigo210640-1.asp>. [consultado em 25/09/2015].

Unicamp- Laboratório de Polímeros Condutores e Reciclagem. [Em linha]. Disponível em <<http://lpcr.iqm.unicamp.br/arquivos/hespumantesnucleantes.pdf>>. [consultado em 25/09/2015].

Unicamp – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica. [Em linha]. Disponível em <<http://www.fem.unicamp.br/~vidalong/projleite.html>>. [consultado em 25/09/2015].

Universidade do Estado do Rio de Janeiro. [Em linha]. Disponível em <http://www.labgis.uerj.br/gis_atualizada/sensoriamento/onda.html>. [consultado em 25/09/2015].

Universidade do Minho. [Em linha]. Disponível em <<http://online.uminho.pt/pessoas/lanceros/Material%20LEGI/Material%20-%20LEGI/Termo%20din%C3%A2mica-L.pdf>>. [consultado em 25/09/2015].

Universidade do Minho – Grupo de Investigação de Plásticos Celulares. [Em linha]. Disponível em <<http://embalagenscelulares.no.sapo.pt/>>. [consultado em 25/09/2015].

Universidade Federal do Paraná. [Em linha]. Disponível em <http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/engenheiro_do_petroleo/traf_calor.pdf> [consultado em 25/09/2015].

Universidade Federal do Paraná_b. [Em linha]. Disponível em <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap1/cap1-2.html>>. [consultado em 25/09/2015].

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. [Em linha]. Disponível em <http://www.fismed.ufrgs.br/sol_efeitos.htm>. [consultado em 25/09/2015].

Valdinei. [Em linha]. Disponível em < <http://slideplayer.com.br/slide/4871809/>>. [consultado em 22/03/2016].